



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE
TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM UMA INDÚSTRIA DE LEITE EM PÓ**

Matheus Scheibel

Lajeado, novembro de 2018

Matheus Scheibel

AVALIAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM UMA INDÚSTRIA DE LEITE EM PÓ

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso Etapa II, do curso de Engenharia Química, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte de exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. André Luís Catto

Lajeado, novembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me proporcionado sabedoria, paciência e força de vontade para concluir este projeto.

Agradeço aos meus pais por me incentivaram todos esses anos, por toda dedicação e paciência, foram eles que me ensinaram a lutar pelos meus objetivos.

Agradeço à minha namorada Vanessa por estar ao meu lado em todos os momentos ao longo do curso, foram momentos difíceis e que exigiram muita paciência e aconselhamento. Aos meus amigos e colegas de classe que participaram juntamente da minha caminhada ao longo da graduação.

Aos meus professores, que sempre estiveram dispostos a compartilhar seus conhecimentos e experiências vivenciadas ao longo de suas carreiras e em especial ao meu orientador Prof. Dr. André Luís Catto, pelos momentos de apoio e dedicação neste projeto.

Muito obrigado!

RESUMO

O transporte de sólidos é uma operação unitária de grande importância nas indústrias, a qual visa a movimentação de sólidos granulares ao longo das áreas de produção. O estudo desta etapa produtiva pode causar grande impacto econômico além de proporcionar melhorias na qualidade do produto final. Atualmente, uma empresa produtora de leite em pó localizada no Vale do Taquari possui um sistema de transporte do produto final a partir de roscas helicoidais, onde ocorrem problemas principalmente na homogeneidade de distribuição às linhas de envase e também de contaminações ocasionadas pela fricção dos helicoides na proteção do transportador. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é propor e desenvolver um novo sistema de transporte destinado à distribuição do leite em pó às linhas de envase da empresa, onde o projeto consiste no planejamento e desenvolvimento teórico de um transportador pneumático com exaustores centrífugos e tubulações, bem como a comparação e análise de custo de energia elétrica entre o processo atual e o novo proposto. A partir da metodologia descrita para o dimensionamento do transportador pneumático, foi possível determinar as variáveis estruturais e de funcionamento, pontos importantes na caracterização da movimentação do leite em pó ao longo dos dutos de transporte e escolha de equipamentos que compõem o sistema. Com isso, os principais resultados obtidos para o novo sistema de transporte proposto são a velocidade de transporte, diâmetro de duto e potência do exaustor, onde se obteve valores de 18,47 m/s 273,73 mm e 2,13 hp respectivamente. Através destes resultados, pode-se prever o funcionamento do sistema de transporte de sólido quanto a sua fluidização, determinar a dimensão do tubo de passagem da mistura de ar e sólidos, e a potência do exaustor para que se tenha a vazão de ar adequada para o arreste do material particulado ao longo do transportador pneumático.

Palavras-chave: Transporte de sólidos, leite em pó, operação unitária, transportador pneumático, Dimensionamento.

ABSTRACT

The transport of solids is a unitary operation of great importance in industries, which aims at the movement of granular solids along the production areas. The study of this productive stage can cause great economic impact besides providing improvements in the quality of the final product. Currently, a powdered milk production company located in Vale do Taquari has a final product transportation system of helical threads, where problems mainly occur in the homogeneity of distribution to the packaging lines and also of contaminations caused by the friction of the helicoids in the protection of the conveyor. Thus, the objective of this work is to propose and develop a new transport system for the distribution of milk powder to the company's packaging lines, where the project consists of the theoretical planning and development of a pneumatic conveying with compressors and pipes, as well as the comparison and analysis of electricity cost between the current process and the proposed new one. From the methodology described for the sizing of the pneumatic conveying, it was possible to determine the structural and operating variables, important points in the characterization of the movement of milk powder along the transport ducts and the choice of equipment that make up the system. Thus, the main results obtained for the proposed new transport system are the transport velocity, duct diameter and potency of the exhaust fan, where it was obtained values of 18,47 m/s, 273,73 mm e 2,13 hp respectively. Through these results, it is possible to predict the operation of the solid transport system in terms of its fluidization, determining the passage pipe size of the air and solids mixture, and the power of the exhaust fan so that the air flows is adequate to drag the particulate material along the pneumatic conveying.

Key words: Transport of solids, milk powder, unitary operation, pneumatic conveying, Sizing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da produção de leite no Brasil ao longo dos anos por região....	18
Figura 2 - Processo básico de transformação	19
Figura 3 - Relação entre fenômenos de transporte e operações unitárias	20
Figura 4 - Peneiras empilhadas sobre plataforma vibratória	24
Figura 5 - Análise granulométrica diferencial (a) e cumulativa (b).....	25
Figura 6 - Esquema básico de um transportador helicoidal	29
Figura 7 - Dimensões importantes para o cálculo do transportador helicoidal	30
Figura 8 - Tipos de helicóide utilizados em transportadores helicoidais.....	30
Figura 9 - Fatores de carga para transportadores helicoidais	31
Figura 10 – Imagem ilustrativa de uma válvula rotativa	35
Figura 11 - Representação das principais partes de uma válvula rotativa	36
Figura 12 – Imagem ilustrativa de um ventilador centrífugo	37
Figura 13 - Configuração do formato de pás utilizadas em ventiladores centrífugos	38

Figura 14 – Imagem ilustrativa de um ventilador multiestágios	38
Figura 15 - Sistema coletor do tipo ciclone	40
Figura 16 - Transportador pneumático de configuração direta (a) e indireta (b)	41
Figura 17 - Transportador pneumático em fase densa (a) e fase diluída (b).....	42
Figura 18 - Fluxograma de uma planta industrial de produção de leite em pó	44
Figura 19 - Metodologia das etapas a serem seguidas no trabalho em organograma	44
Figura 20 - Fluxograma do processo de envase do leite em pó utilizado atualmente pela empresa.....	45
Figura 21 - Transporte helicoidal principal, tanque pulmão e roscas de distribuição	46
Figura 22 - Pulmões de fracionamento que alimentam o sistema de envase do leite em pó	46
Figura 23 - Análise morfológica do leite em pó	53
Figura 24 - Distribuição de frequência de diâmetros das partículas.....	53
Figura 25 - Ventilador centrífugo.....	55
Figura 26 - Válvula rotativa.....	55
Figura 27 - Três dimensões do taque pulmão de distribuição	56
Figura 28 - Três dimensões do taque de recebimento e envase.....	57
Figura 29 - Diagrama de tubulação e instrumentação do sistema de transporte pneumático.....	58
Figura 30 - Identificação de um instrumento	59
Figura 31 - Diagrama de Gantt para o funcionamento do sistema de transporte pneumático.....	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Técnicas de determinação de diâmetro de partícula.....	23
Quadro 2- Fator de potência para calcular a potência consumida em transportadores helicoidais.....	33
Quadro 3 - Comparativo das características de transportadores pneumáticos de fase densa e diluída.	42
Quadro 4 - Identificação e descrição dos instrumentos presentes no P&ID.....	59
Quadro 5 - Custos dos equipamentos e serviços para a instalação do novo sistema de transporte pneumático.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre mesh e a abertura em μm	24
Tabela 2 - Relação entre diâmetro e número de rotações do helicóide para o dimensionamento de transportadores helicoidais	32
Tabela 3 - Relação do diâmetro do duto com o comprimento equivalente.....	49
Tabela 4 - Relação do equipamento coletor e a perda de carga gerada no transportador pneumático	50
Tabela 5 - Características de projeto do transportador pneumático.....	54
Tabela 6 - Potência dos principais equipamentos elétricos que compõem o atual sistema de transporte.....	64
Tabela 7 - Potência dos principais equipamentos elétricos que compõem o novo sistema de transporte.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\Delta\phi_i$	Fração retida
m_i	Massa retida na peneira i
M	Massa total da amostra
$\overline{D_a}$	Diâmetro médio aritmético
$\overline{D_s}$	Diâmetro médio superficial
$\overline{D_v}$	Diâmetro médio volumétrico
$\overline{D_{sa}}$	Diâmetro de Sauter
C	Capacidade do transportador
D	Diâmetro do helicóide
ρ	Densidade aparente
N	Número de rotação
Q	Capacidade volumétrica
P	Potência requerida
L	Comprimento do transportador

F	Fator de potência
H	Elevação (m)
m_{H_2O}	Massa de água deslocada
m_1	Massa da amostra
m_2	Massa do picnômetro + massa da água
m_3	Massa do picnômetro cheio de água + massa da amostra
ρ_p	Densidade específica do material
ρ_{pa}	Densidade específica aparente do material
V	Volume da amostra
ϵ_p	Porosidade do material particulado
\emptyset	Esfericidade das partículas
m_i	Massa de uma partícula
A_i	Área de uma partícula
Dt	Diâmetro do transportador pneumático
Qg	Vazão do gás de transporte
Pv	Potência do ventilador ou soprador
V	Velocidade de transporte
Lt	Comprimento total
Lh	Comprimento total dos trechos horizontais
Lv	Comprimento total dos trechos verticais
Le	Comprimento equivalente das curvas, válvulas e demais conexões

- X** Concentração em peso de sólido transportado
- ΔP_t Perda de carga total do sistema pneumático
- φ_p Fator de redução da perda de carga por aceleração
- ΔP_e Perda de carga nos equipamentos do transportador pneumático
- n Fator da perda de carga entre a garganta e o ventilador

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa.....	16
1.2	Objetivo geral	17
1.2.1	Objetivos específicos.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Indústria e mercado do leite em pó	18
2.2	Operações unitárias	19
2.3	Sistemas fluidomecânicos e particulados	21
2.3.1	Princípios de sistemas fluidomecânicos	21
2.3.2	Caracterização de partículas.....	22
2.3.2.1	Tamanho de partícula e sua determinação	23
2.4	Transporte de sólidos	27
2.4.1	Transportadores helicoidais	29
2.4.1.1	Dimensionamento do transportador helicoidal	31
2.4.2	Transportadores pneumáticos.....	34
2.4.2.1	Válvulas rotativas	35
2.4.2.2	Equipamentos geradores de pressão ou vácuo	37
2.4.2.3	Tubulações	39
2.4.2.4	Coletores.....	40
2.4.2.5	Características e configurações de transportadores pneumáticos.....	41

3	METODOLOGIA	44
3.1	Sistema de transporte atual	45
3.2	Análise das características do leite em pó	47
3.3	Dimensionamento do transportador pneumático	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Detalhamento do processo	57
4.1.1	Tempo de processamento	61
4.2	Levantamento de custos	63
4.3	Avaliação e discussão dos resultados.....	64
5	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

No ramo industrial, processo é um conjunto de etapas que envolvem a transformação da matéria-prima em produto final. Cada etapa envolvida em um procedimento de modificação pode ser dividida e caracterizada, sendo esta a ideia central na qual se apoia o conceito de operações unitárias. A função de um profissional qualificado é analisar o processo como um todo e subdividi-lo em operações básicas, considerando a dependência de princípios físicos e termodinâmicos envolvidos na transformação (MATOS, 2015; TADINI et al., 2018).

Com a expansão e crescimento da engenharia nas diversas áreas de projeto e desenvolvimento de novos equipamentos, é fundamental compreender fenômenos físicos e químicos de cada etapa pertencente aos processos de transformação. Ao longo dos anos, novos métodos e a utilização de diferentes operações com semelhança em aspectos físicos e termodinâmicos à fabricação de produtos são estudadas e adaptadas, com a finalidade de melhor atender a metodologia de fabricação, levando em consideração o custo de desenvolvimento, instalação, manutenção e gastos energéticos de equipamentos, sendo que todos esses aspectos devem atender à qualidade do produto final (MATOS, 2015).

Segundo Tadini et al. (2018), uma operação unitária pode ser projetada a partir de descrições matemáticas, que podem auxiliar em projetos de novos processos, descrever o comportamento de um processo e para controlar ou modificar um processo já existente.

As indústrias de alimentos, por exemplo, têm sua base de produção dividida em operações unitárias, sendo que as mais importantes compreendem a cominuição e transporte de sólidos, escoamento de fluidos, evaporação, extração, processamento térmico, cristalização, separação mecânica e agitação (TADINI et al., 2018).

Com base nos argumentos supracitados, é possível definir que um profissional atuante na área da engenharia química pode desempenhar e aplicar seus conhecimentos no ramo de projetos de processos industriais, uma vez que este especialista possui em seu currículo acadêmico, disciplinas voltadas especialmente às operações unitárias, instrumentação e controle de processos e projeto de engenharia química.

As indústrias de transformação produzem determinado produto a partir de um conjunto de operações, cada uma dessas operações deve atender a especificidades e variáveis de trabalho de equipamentos, qualidade e segurança de produtos e funcionários. Um processo industrial para ser implementado deve ser desenvolvido, passar por análises, simulações e se possível, testes em escala piloto. Por fim, a planta produtiva pode ser instalada, dando início às atividades, porém mesmo seguindo todas as recomendações nas etapas de desenvolvimento de equipamentos e processos, os comportamentos reais podem divergir dos apresentados em cálculos e simulações, podendo apresentar em escala industrial um rendimento produtivo menor que o esperado e alto consumo de energia, ocasionar um processo não homogêneo ou necessidade de inúmeras manutenções. Com isso, muitas empresas buscam um *upgrade* em sua linha de equipamentos, objetivando melhor autonomia de trabalho, rendimento operacional, economia energética, qualidade do produto e segurança.

Com isso, a problemática no processo de uma empresa produtora de leite em pó localizada no Vale do Taquari será avaliada neste trabalho. Atualmente o transporte do produto final até as linhas de embalagem é realizado por roscas helicoidais. O problema inicia-se no tanque pulmão de recebimento do leite em pó, no qual uma rosca helicoidal principal distribui o produto para outras cinco roscas de mesmo tipo, onde a partir daí o produto é carregando até os equipamentos

destinados ao seu empacotamento. O transporte utilizado atualmente não proporciona uma distribuição homogênea no silo pulmão, ocasionando a sobrecarga em determinada linha empacotadora, sendo que as demais trabalham abaixo de sua capacidade. Outra peculiaridade do processo é que o leite em pó pode aglomerar-se e vitrificar durante o transporte, formando aglomerados duros que ao passarem pelo helicoide da rosca, podem danificá-lo. Com isso, a rosca acaba friccionando-se com a parede interna do transportador, podendo soltar pedaços ou resquícios de material constituinte de sua proteção, que contaminam assim o produto, afetando diretamente sua qualidade.

Assim, o intuito deste trabalho é de propor e desenvolver um novo sistema transportador destinado à distribuição do leite em pó às linhas de envase da empresa. O projeto irá consistir no planejamento e desenvolvimento teórico de um transportador pneumático com compressor e tubulações, análise do sistema de instrumentação e perdas de carga, bem como a comparação e análise de custos entre o processo atual e o novo proposto.

1.1 Justificativa

A formação acadêmica de um estudante de engenharia química é um conjunto de disciplinas teóricas e práticas. A teoria dará ao estudante toda base de conhecimentos, já as atividades e complementos práticos proporcionam a aplicação de inúmeros conteúdos estudados em sala de aula. O trabalho de conclusão de curso tem caráter investigatório e prático, o qual oportuniza ao estudante a revisão de conteúdos antes vistos, bem como novos tópicos. Este conjunto cria uma fonte de educação transformadora e inovadora, a qual está associada ao desenvolvimento científico e tecnológico. Neste viés, a tecnologia não somente se enquadra a novos inventos, mas também à crescente transformação técnica, otimização e adaptação de processos produtivos.

Com isso, o presente trabalho justifica-se pelo seu caráter investigatório, bem como o desenvolvimento teórico de uma nova tecnologia de transporte para uma empresa produtora de leite em pó. Para isso é necessário o domínio da ciência e

conhecimentos das operações unitárias e fenômenos de transporte, aproximando a teoria vista no curso com a prática dentro de uma indústria.

1.2 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo principal o desenvolvimento de um sistema de transporte pneumático em uma indústria de leite em pó localizada no Vale do Taquari, relacionando fatores de custo de energia elétrica, perdas de carga, segurança e garantida de qualidade do produto.

1.2.1 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos foram definidos para atingir o objetivo geral deste trabalho:

- Avaliar o atual sistema de transporte helicoidal utilizado pela empresa, bem como seu rendimento de processo, segurança e qualidade em relação ao produto
- Analisar a granulometria do leite em pó, para obtenção de dados necessários para o dimensionamento de um novo sistema de transporte;
- Realizar o dimensionamento do novo sistema pneumático destinado ao transporte de leite em pó, definindo as variáveis de trabalho e instrumentação necessárias e os equipamentos que serão necessários (tubulações, válvulas, instrumentos, compressores ou sopradores).
- Avaliar a viabilidade econômica do novo sistema de transporte pneumático comparando os custos operacionais com o sistema atual.

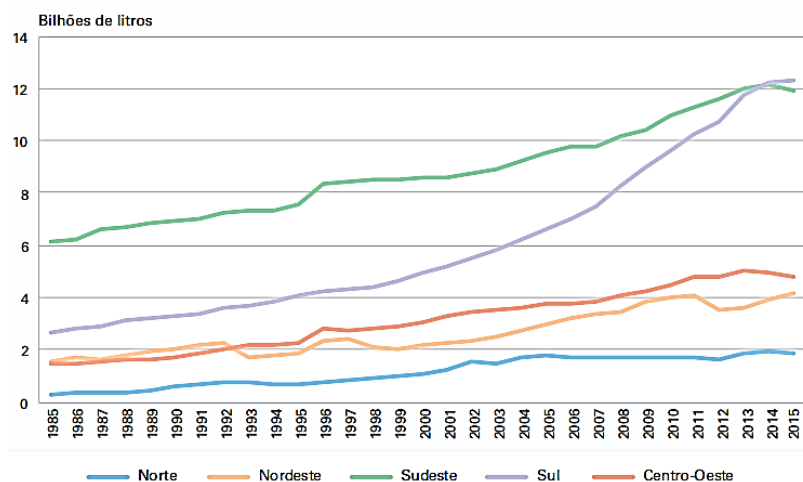
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Indústria e mercado do leite em pó

O leite é um produto originado da secreção da glândula mamária das fêmeas no período de lactação e trata-se de um alimento de grande valor nutricional, pois é composto de nutrientes essenciais à alimentação (BRASIL, 2002).

A pecuária leiteira tem grande influência no mercado interno e externo brasileiro. A Figura 1 mostra a evolução da produção de leite, segundo cada região do país.

Figura 1 - Evolução da produção de leite no Brasil ao longo dos anos por região



Fonte: Adaptado pelo autor, com base em IBGE (texto digital, 2015).

Dados do Instituto Brasileiro Geográfico Estatístico (IBGE, 2015), mostram que o Brasil alcançou produção de 35 bilhões de litros em 2015, somando todas as regiões do país.

Com o aumento da produção e consumo do leite, foi necessário aprimorar novas técnicas de obtenção, industrialização, higienização, transporte e conservação, com a finalidade de garantir um produto de qualidade e com vida de prateleira (*shelf life*) adequada (NICOLINI, 2008). Dessa maneira surge o leite em pó, um produto derivado do leite natural obtido pela desidratação do leite, que pode ser integral, semidesnatado ou desnatado. A água presente no leite “in natura” é retirada a partir de operações unitárias como a evaporação, secagem e posterior transporte em tubulações ou calhas para recipientes de estocagem.

2.2 Operações unitárias

As operações unitárias são etapas fundamentais em indústrias de processos químicos, pois são responsáveis pela transformação física e/ou química de materiais, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos. Inclui-se também neste grupo as etapas de manuseio, armazenagem e distribuição de matérias-primas ou produto final destinado a comercialização. Neste âmbito, citam-se, por exemplo, indústrias químicas, petroquímicas, alimentos e farmacêuticas. Em inúmeros processos, seja ele o refino do petróleo, obtenção de polímeros, purificação de gases, extração do alumínio, fabricação de ácido sulfúrico entre outros, são necessário um conjunto operações unitárias, cada uma com determinada finalidade, para que no final seja obtido o produto desejado (TORREN, 2012).

De acordo com Cremasco (2012), as operações unitárias são etapas intermediárias entre a matéria-prima e o produto final, conforme ilustrado no diagrama da Figura 2.

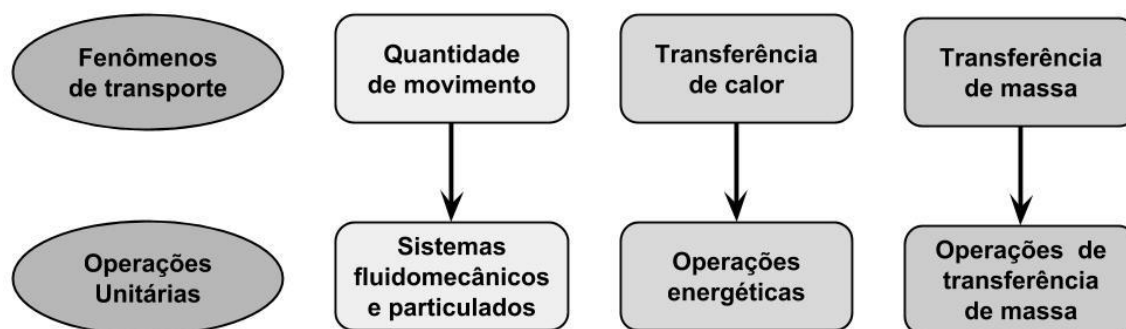
Figura 2 - Processo básico de transformação



Fonte: Adaptado de Cremasco (2012, p. 19).

Qualquer que seja o processo pode ser caracterizado por diversas etapas, sendo estas de natureza física e/ou química. Esta área está intimamente ligada à engenharia química, uma vez que este ramo tecnológico fomenta a investigação e aplicação de conceitos voltados a fenômenos de transporte, os quais fundamentam as bases científico-tecnológicas de operações e processos à aplicação de projetos técnicos, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Relação entre fenômenos de transporte e operações unitárias



Fonte: Adaptado de Cremasco (2012, p.24).

Segundo Torren (2012), é de grande importância conhecer o fenômeno físico na qual determinada operação unitária se baseia, pois assim é possível representá-la por um modelo matemático. A elaboração de tal modelo consiste primeiramente na tradução do processo e suas variáveis para uma linguagem abstrata. Busca-se então a resolução do problema usando o modelo desenvolvido, ou seja, solucioná-lo para as condições desejadas, considerando-se o regime de variáveis abstratas. A última etapa consiste na interpretação dos resultados e, assim que alcançado a solução, traduz-se as variáveis à linguagem física real. Este ponto é de extrema importância, pois dependendo dos resultados numéricos, muitas vezes tomam-se como base para determinada modelagem considerações absurdas e inapropriadas

com a realidade física, sendo isso decorrente da falta de informação sobre o tipo de fenômeno físico em estudo.

2.3 Sistemas fluidomecânicos e particulados

As operações unitárias que envolvem o transporte de fluidos, misturas de gases e líquidos, de sólidos, e mistura de sólidos e fluidos, levando em consideração a interação física entre fluido-fluido, fluido-sólido e sólido-sólido em sistemas de transporte, separação, mistura e/ou modificação de tamanho de partículas, são chamadas operações unitárias de quantidade de movimento. Enquadram-se na categoria de sistemas fluidomecânicos e particulados (CREMASCO, 2012).

Quando um conjunto formado por máquinas e/ou dispositivos tem a função de adicionar ou extrair energia de um fluido, diz-se que este sistema é fluidomecânico. Desse modo, as operações unitárias ligadas a esse modelo são etapas em que estão presentes a movimentação, transporte ou agitação de fluidos ou misturas sólido-fluido. Os dispositivos relacionados com este tipo de processo são conhecidos como máquinas de fluidos, e realizam a troca de energia entre o sistema mecânico e um fluido. Bombas, sopradores e compressores são exemplos deste tipo de máquina utilizados. Em sistemas particulados, é necessário conhecer a interação sólido-sólido e sólido-fluido, com ou sem o efeito de máquinas de fluidos. As operações unitárias ligadas a este tipo de sistema são mistura, transporte, cominuição da partícula, separação, centrifugação sólido-líquido, escoamento de fluidos através de leitos móveis e fixos de particulados, transporte hidráulico e pneumático de sólidos, entre outros (CREMASCO, 2012).

2.3.1 Princípios de sistemas fluidomecânicos

Para máquinas de fluidos entende-se por singularidade todo o conjunto de tubos, cotovelos, válvulas, medidores de vazão e dispositivos responsáveis pela adição ou extração de energia do sistema. Normalmente o deslocamento do fluido ocorre dentro de tubulações e, muitas vezes é indispensável a utilização de bombas e compressores, já que são os equipamentos responsáveis pelo transporte, que

promovem a energia necessária para tal escoamento. Ao se tratar de dimensionamento, é imprescindível conhecer a distância total que o fluido irá percorrer, os materiais e acessórios que compõem a tubulação (cotovelos, curvas, medidores de vazão e demais acessórios), as propriedades do fluido, bem como a perda de carga gerada (SCHIOZER, 1990).

2.3.2 Caracterização de partículas

Em sistemas particulados têm-se a interação entre partícula-partícula e/ou partícula-fluido, assim os estudos científicos voltados a essa categoria de operações unitárias exigem a compreensão das características de uma partícula ou de uma amostra de partículas, sendo a base para pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias no que diz respeito a sistemas particulados (CREMASCO, 2012).

É essencial conhecer as características físicas e morfológicas das partículas, pois tais propriedades afetam diretamente interações entre os elementos constituintes do sistema, como a difusão mássica que ocorre no interior ou entre esses particulados. Pode-se dizer que os fenômenos de transporte relacionados à transferência de massa estão intimamente associados às propriedades dos materiais particulados, visto que dependendo do processo como, por exemplo, com reação química esta reação pode ser favorecida ou prejudicada, e a natureza do particulado pode ter grande influência na eficiência final. Desta forma, é necessária atenção especial na etapa de caracterização de sólidos, pois é de extrema importância conhecer as características do material, como forma, área superficial, tamanho, volume, densidade e esfericidade, tendo em vista que certas características dos particulados afetam diretamente tanto aspectos construtivos como diâmetro e altura útil de equipamentos, quanto operacionais, na definição de vazões de operação e perdas de carga (GOMIDE, 1983; MATOS, 2015; MASSARANI, 1984).

2.3.2.1 Tamanho de partícula

Conforme Cremasco (2012), quando deseja-se obter o diâmetro de partícula representativo a partir de uma amostra, existem técnicas para determinar tal parâmetro. O Quadro 1 apresenta algumas técnicas utilizadas na análise de tamanho de partículas.

Quadro 1 - Técnicas de determinação de diâmetro de partícula

Técnica	Descrição	Faixa de tamanho (µm)
Peneira	Peneiramento por agitação mecânica ou ultrassônica	20 – 100.000
	Micropeneiramento	5 – 50
Sedimentação	Gravimetria	1 – 250
	Centrífuga	0,05 – 60
Microscopia	Eletrônica (MEV)	0,01 – 1
	Óptica	0,2 – 50
Turbidimetria	Atenuação da intensidade de luz	0,05 – 500
Resistividade	Contador <i>Coulter</i>	0,5 – 800
Elutriação	Escoamento de fluido	5 – 50
Permeabilidade	<i>Fischer Subsieve</i> (fluxo de ar por orifício calibrado)	0,2 – 50
Área superficial	Absorção de gás	0,01 – 20
	Penetração de líquido	0,01 – 50

Fonte: Oliveira Filho (2007, p. 31).

Para Gomide (1983), o peneiramento é uma técnica de representação simples e muito utilizada na determinação do tamanho da partícula, sendo baseada na massa de partícula.

Ao se alimentar a amostra na primeira peneira, uma certa quantidade da amostra poderá ficar retida, enquanto boa parte a atravessa e se deposita na segunda peneira, a qual, por sua vez, poderá reter uma quantidade do material remanescente oriunda da primeira peneira, enquanto uma outra parte a atravessará para, a seguir, alimentar a terceira peneira e assim por diante. Trata-se, portanto, de um processo do tipo “passa/não passa”, e as barreiras são constituídas pelos fios da malha. [...] As dimensões de tais aberturas são dadas em milímetro ou em *mesh*, o qual se refere ao número de aberturas por polegada linear (CREMASCO, 2012, p. 142).

Nesta técnica, determinada quantidade de amostra é passada através de uma série de peneiras, conforme mostrado na imagem da Figura 4.

Figura 4 - Peneiras empilhadas sobre plataforma vibratória



Fonte: Do autor (2018).

As relações que existem entre *mesh*, *micrômetro* e milímetro no dimensionamento de partículas pode ser verificada na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação entre mesh e a abertura em μm

Mesh	μm	Mesh	μm
10	2.000	60	250
12	1.680	70	210
14	1.410	80	177
16	1.190	100	149
18	1.000	120	125
20	841	140	105
25	707	170	88
30	595	200	74
35	500	230	63
40	420	270	53
45	354	325	44
50	297	400	37

Fonte: Cremasco (2012, p. 143).

Segundo Gomide (1983), para determinar as quantidades e respectivas frações retidas nas peneiras, primeiramente verifica-se a massa do conjunto

(peneira + amostra), com isso, podem-se determinar as frações, dividindo-se as massas retidas de cada conjunto pela massa total da amostra (GOMIDE, 1983), conforme mostrado na Equação 1.

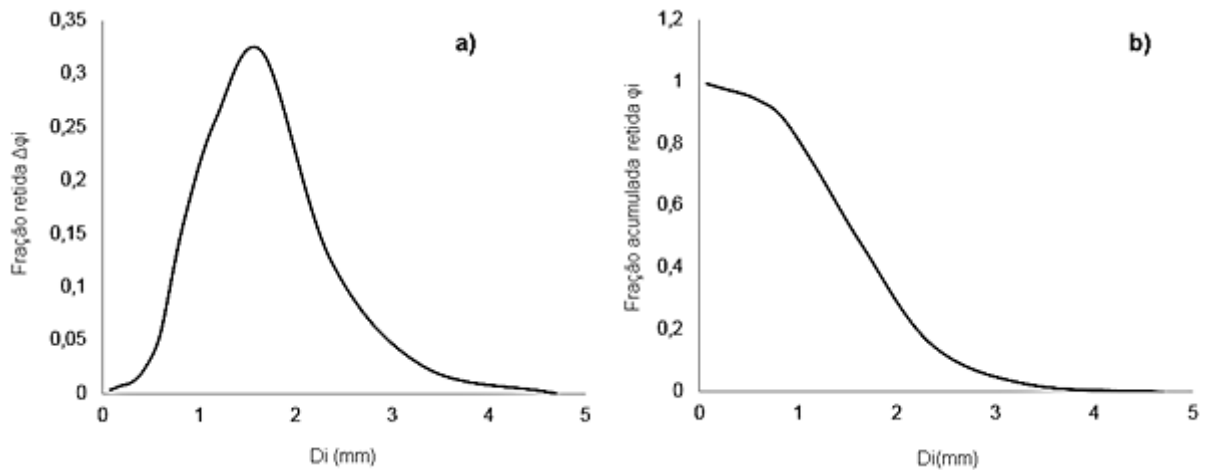
$$\Delta\varphi_i = \frac{m_i}{M} \quad (1)$$

Onde: $\Delta\varphi_i$ = fração retida; m_i = massa retida sobre a peneira i ; M = massa total da amostra.

Na análise granulométrica diferencial supõe-se que a fração retida em cada peneira apresenta o mesmo tamanho, sendo essa fração representada pelo diâmetro de partícula ($\overline{D_i}$), que é a média aritmética das aberturas das malhas, onde verifica-se a retenção de amostra, ou seja, a peneira i e $i - 1$. Na realização da análise acumulada os resultados são mais exatos comparando-se com a análise diferencial, sendo decorrente da relação entre D_i e fração acumulada retida (φ) e tornando-se uma função contínua e de tratamento matemático passível (GOMIDE, 1983).

Para realizar a análise granulométrica faz-se necessário a execução da distribuição estatística de tamanhos. A Figura 5 mostra esta distribuição das frações retidas ou acumuladas em função de D_i . Esta distribuição pode ser em função da frequência relativa das partículas com determinado diâmetro (Figura 5-a), ou pode ser expressa pela fração cumulativa de partículas (Figura 5-b). Na utilização de peneiramento, os parâmetros são expressos em função da massa, já na análise de imagens, os parâmetros são função do número de partículas (McCABE; SMITH; HARRIOTT, 2004).

Figura 5 - Análise granulométrica diferencial (a) e cumulativa (b)



Fonte: Do autor (2018).

Outra técnica amplamente empregada na determinação do tamanho da partícula é a análise de imagem. Esta técnica consiste na verificação computacional de imagens digitalizadas. A imagem digital é obtida através da técnica de microscopia. O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um exemplo de ferramenta utilizada para este fim, onde uma matriz constituída da amostra é incidida por um feixe de elétrons, sob condição de vácuo. Os elétrons incididos provocam uma emissão de elétrons secundários e ocorre um retroespalhamento, com isso o dispositivo realiza o mapeamento do material analisado (DUARTE et al., 2003).

Após realizar a análise granulométrica e definir os parâmetros de frações retidas e diâmetros de partícula em cada conjunto de peneira nas quais as amostras ficam retidas, é possível calcular o diâmetro médio aritmético (Equação 2), superficial (Equação 3), volumétrico (Equação 4) e diâmetro de Sauter (Equação 5).

$$\overline{Da} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\phi_i}{D_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\phi_i}{D_i^3}} \quad (2)$$

$$\overline{Ds} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\phi_i}{D_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\phi_i}{D_i^3}}} \quad (3)$$

$$\overline{Dv} = \sqrt[3]{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\phi_i}{D_i^3}}} \quad (4)$$

$$Dp = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\phi_i}{D_i}} \quad (5)$$

Onde: $\overline{D_a}$ = diâmetro médio aritmético (mm); $\overline{D_s}$ = diâmetro médio superficial (mm) $\overline{D_v}$ = diâmetro médio volumétrico (mm); D_p = diâmetro de Sauter (mm); D_i = diâmetro de partícula (mm); $\Delta\phi_i$ = fração retida.

Os parâmetros de diâmetro de partículas são importantes, pois servem para definir a superfície externa e volume total da amostra e dessa maneira, caracterizar materiais adsorventes e catalisadores. Permite também o estudo de escoamento de fluidos em leitos porosos e cálculos de perda de carga em sistemas de transporte pneumático (GOMIDE, 1983).

2.4 Transporte de sólidos

O transporte de sólidos é uma operação unitária que tem como objetivo movimentar sólidos granulares em regimes contínuos bem definidos no interior de áreas de produção. O estudo desta etapa produtiva tem grande importância industrial, pois inúmeras empresas, sejam elas de grande ou pequeno porte, exigem algum tipo de transporte de particulados. Também é possível citar sua influência na economia dos processos, sendo que em determinados casos, o custo de transporte pode atingir 80%. Outros fatores que implicam na seleção de um sistema de transporte são a substituição contínua de maquinários por outros mais sofisticados que não exijam grande número de operadores, variedade de sólidos, incluindo a viabilidade, capacidade, espaço e condições de transporte. Assim, baseado na exigência de seleção ou dimensionamento de determinado equipamento destinado ao transporte de sólidos, busca-se o estudo de variáveis que possam evidenciar tal necessidade (GOMIDE, 1983).

As variáveis do processo são essenciais na análise e projeto de um sistema de transporte de sólidos, como por exemplo a capacidade produtiva referente ao processo, englobando os sistemas de distribuição, armazenamento e embalagem, pois alguns tipos de transportador são adequados para grandes volumes, enquanto outros, para empresas de baixo volume produtivo. É necessário também conhecer a distância e desnível de carga e descarga, pois existem equipamentos que podem operar em grandes distâncias e/ou grandes desníveis. Outra variável muito importante é a natureza do material, posto que propriedades físicas e mecânicas do

particulado, bem como granulometria, diâmetro, fragilidade, umidade, dureza, aderência e densidades influenciam no momento da escolha ou no projeto de um transportador. Ao se tratar de fatores econômicos, este é um atrativo para as empresas, visto que se busca um sistema eficiente, que atenda a demanda produtiva, com baixo custo inicial de instalação e menor custo de manutenção, energia e operação (PERRY; GREEN, 2007).

Para Gomide (1983, p.111), existem duas classificações de equipamentos destinados ao transporte de sólidos: 1º) aqueles cuja posição permanece fixa durante o transporte, muito embora possuam partes móveis; 2º) os que se movimentam com o sólido, como pás carregadoras, vagonetas, empilhadeiras, caminhões, guinchos e guindastes. O primeiro tipo citado é o mais adequado a transportes contínuos de sólidos e os mais utilizados na indústria de processos químicos. Tem-se também a subdivisão pelo tipo de ação no qual o transportador irá desenvolver, podendo desempenhar as seguintes funções: carregadores; elevadores; arrastadores; alimentadores e pneumáticos (GOMIDE, 1983).

Os dispositivos carregadores são destinados a carregar continuamente o material sólido. Neste tipo de equipamento, realiza-se o deslocamento dos particulados sobre superfícies ou dentro de tubos. Nesta subcategoria, enquadram-se as correias, esteiras, caçambas, correntes, sistemas vibratórios e por gravidade (GOMIDE, 1983).

Quando o sólido é arrastado em calhas ou dutos, tem-se os dispositivos arrastadores, os quais de modo geral possuem menor custo inicial de instalação se comparados aos carregadores. Estes equipamentos são indicados para transporte inclinado, podendo chegar a inclinações de trabalho de 45°, porém, essa peculiaridade faz com que o custo de manutenção seja mais elevado, devido ao desgaste gerado no equipamento. Enquadram-se nos dispositivos arrastadores os transportadores de calha e helicoidal (SILVA, 2008).

Em indústrias onde existe a necessidade de transportar sólidos em grandes inclinações ou verticalmente, emprega-se um dispositivo elevador. Nesta subcategoria, além do transportador de canecas, podem-se listar equipamentos já citados como os transportadores de calha, correia e helicoidal, os quais também

podem ser empregados como equipamentos elevadores, pois se adaptam muito bem ao transporte inclinado ou verticalizado (GOMIDE, 1983).

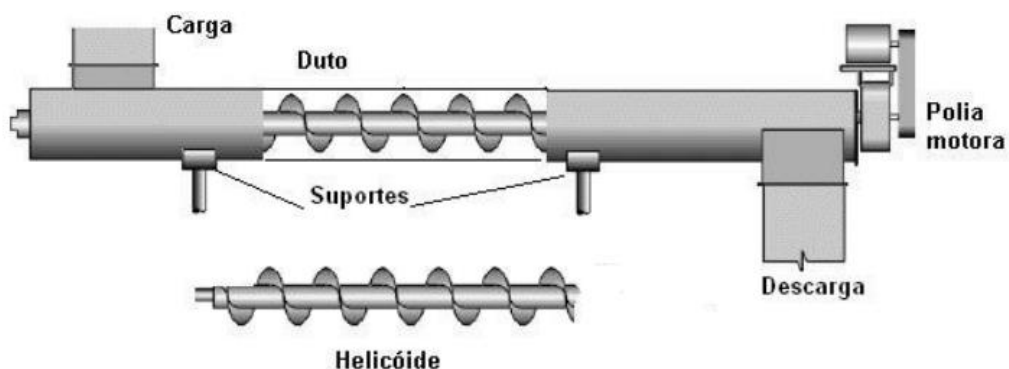
No processamento de um material sólido e posterior necessidade de transporta-lo em regime permanente, mantendo a alimentação de determinada etapa produtiva em vazão constante, utiliza-se para este fim dispositivos alimentadores. Estes transportadores podem ser gravimétricos ou volumétricos. Nesta subcategoria exige-se grande estudo com relação à variabilidade das características do material particulado, pois manter a vazões de alimentação constante é uma tarefa difícil nas indústrias, em virtude da não uniformidade das partículas e sólidos granulares aderentes (FOUST; WENZEL; CLUMP, 2013).

Já os dispositivos pneumáticos são largamente empregados na movimentação e elevação de materiais particulados finos em indústrias. A grande utilização destes equipamentos decorre da sua versatilidade de distâncias, desde pequenas até longas, variabilidade da granulometria do material, podendo ser transportado pós finos com tamanhos acima de 100 μm até grãos de 1 cm, e a densidade do material que pode variar desde 15 kg/m^3 até 3 t/m^3 (GOMIDE, 1983).

2.4.1 Transportadores helicoidais

Os transportadores helicoidais possuem amplo emprego nas indústrias pela sua versatilidade de transporte com pequenas vazões, curtas distâncias e realização de outros tipos de operações simultâneas ao arrastes de material particulado como mistura, cristalização, resfriamento, extração e secagem. Este tipo de transportador é constituído de um condutor estacionário (tubo ou canaleta semicircular) onde no interior gira um eixo com uma helicoide movimentada por uma polia motora, conforme mostra a Figura 6 (SILVA, 2008).

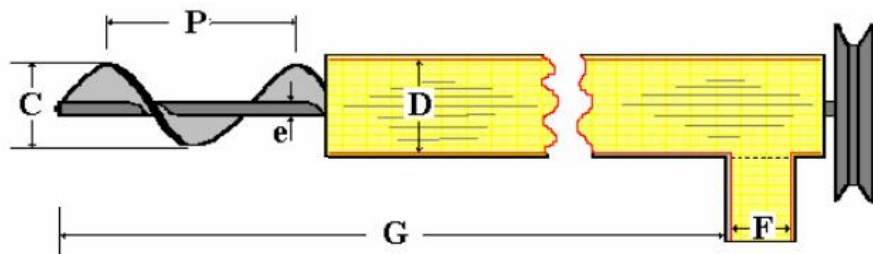
Figura 6 - Esquema básico de um transportador helicoidal



Fonte: adaptado de Silva (2008, p. 299).

Segundo Silva (2008), as principais dimensões de um helicóide são: passo (P), o qual consiste na distância entre duas cristas consecutivas medidas paralelamente ao eixo do parafuso; diâmetro do duto (D); diâmetro do helicóide (C); diâmetro do eixo (e); comprimento do helicóide (G); e diâmetro de descarga (F). É possível observar essas dimensões na Figura 7.

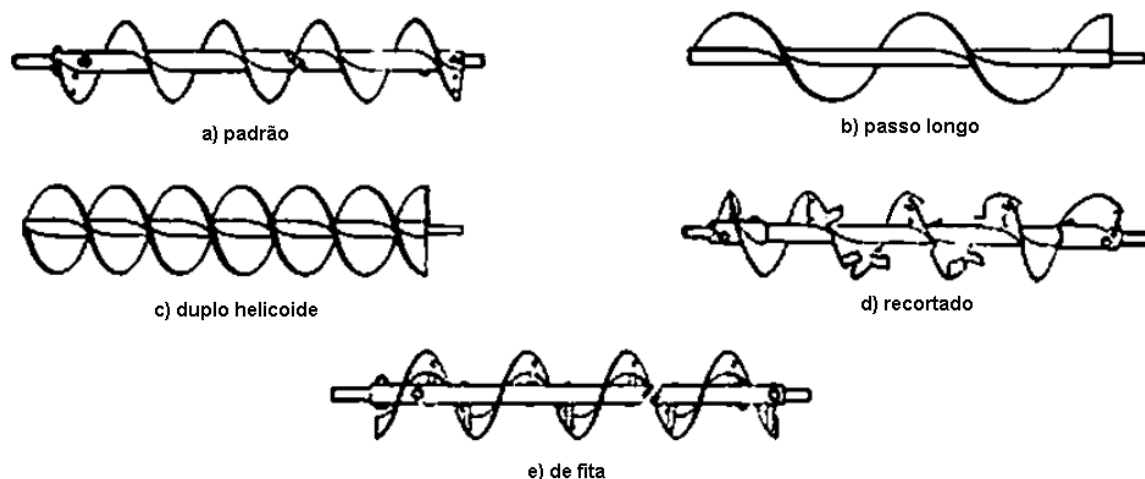
Figura 7 - Dimensões importantes para o cálculo do transportador helicoidal



Fonte: adaptado de Silva (2008, p. 299).

A versatilidade dos transportadores helicoidais é decorrente dos vários tipos de helicóides que podem ser utilizados, conforme mostra a Figura 8: a) padrão, com o passo igual ao diâmetro do helicóide, sendo utilizado para transportar materiais particulados com inclinação de trabalho até 20°; b) passo longo, para materiais de fácil arraste; c) duplo helicóide e d) recortado, utilizados como transportadores misturadores; e) fita, empregado na mistura de pastas (GOMIDE, 1983; SILVA, 2008).

Figura 8 - Tipos de helicóide utilizados em transportadores helicoidais



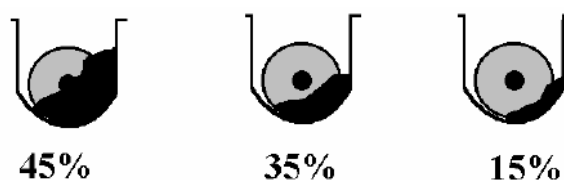
Fonte: adaptado de Gomide (1983, p.146).

Os transportadores helicoidais podem atuar como dispositivos arrastadores, os quais operam com a calha aberta na parte superior, mas são limitados quanto à inclinação de trabalho, geralmente 20° . Quando a calha é fechada, pode-se utilizar estes dispositivos como elevadores, desde que o passo e folga entre o helicoide e o duto sejam reduzidos (GOMIDE, 1983).

2.4.1.1 Dimensionamento do transportador helicoidal

O dimensionamento de transportadores helicoidais tem como objetivo estimar a capacidade e potência necessária do transportador para realizar determinado trabalho. A capacidade de transporte está diretamente relacionada com o produto e fator de carga, conforme mostrado na Figura 9. Para grãos ou particulados finos que não possuem características abrasivas, utiliza-se uma carga mínima de 45%. Para materiais abrasivos, fibrosos, polpas e sólidos grosseiros, a carga ideal é de 35%. Já na utilização de particulados pesados e abrasivos, a carga não deve ser superior a 15% (SILVA, 2008).

Figura 9 - Fatores de carga para transportadores helicoidais



Fonte: adaptado de Silva (2008, p. 301).

O método de dimensionamento de transportadores helicoidais consiste inicialmente na definição da velocidade de transporte em função do diâmetro do helicóide. Definido o diâmetro do helicóide, utiliza-se os dados da Tabela 2 para estabelecer o número de rotações.

Tabela 2 - Relação entre diâmetro e número de rotações do helicóide para o dimensionamento de transportadores helicoidais

D(m)	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60
N(rpm)	230	200	175	160	150	140	133	127	122	113

Fonte: adaptado de Gomide (1983, p.150).

Após a determinação do número de rotações e diâmetro do sistema, a capacidade do transportador é obtida através da Equação 6.

$$C = 12,3 \cdot D^3 \cdot \rho_{pa} \cdot N \quad (6)$$

Onde: C = capacidade (t/h); D = diâmetro do helicóide (m); ρ_{pa} = densidade aparente (t/m³); N = número de rotação (rpm).

A fim de evitar o método por tentativa e erro no cálculo da capacidade do transportador, até encontrar o par de valores que correspondam à capacidade desejada para o sistema de transporte helicoidal, utiliza-se a Equação 7 para descobrir o número de rotações ou diâmetro (GOMIDE, 1983).

$$N = \frac{92,2}{D^{0,4}} \quad (7)$$

Onde: D = diâmetro do helicóide (m); N = rotação (rpm).

A partir da relação entre capacidade e densidade aparente, obtêm-se a capacidade volumétrica, conforme Equação 8.

$$Q = \frac{C}{\rho_{pa}} \quad (8)$$

Onde: Q = capacidade volumétrica (m³/h); C = capacidade do transportador (t/h); ρ_{pa} = densidade aparente (t/m³).

Combinando a Equação 8 com a correlação de capacidade, é possível definir diretamente o diâmetro do transportador a partir da Equação 9.

$$D = \frac{Q^{0,385}}{15} \quad (9)$$

Onde: D = diâmetro do helicóide (m³/h); Q = capacidade volumétrica (m³/h).

Em projetos relacionados com equipamentos helicoidais, erros nos cálculos de potência mínima necessária para o funcionamento do equipamento são problemas decorrentes. Para minimizar esses erros, utiliza-se uma metodologia de classificação inicial do material, na qual o sólido particulado pode ser enquadrado em uma das cinco classes constituintes do método e cada classificação possui um fator F que serve para calcular a potência consumida, conforme mostra o Quadro 2 (GOMIDE, 1983).

Quadro 2- Fator de potência para calcular a potência consumida em transportadores helicoidais

Classe	Características	Exemplos	Fator de potência
A	Materiais finos, leves, não abrasivos de escoamento fácil. Densidade entre 0,5 e 0,6 t/m ³	Carvão moído, caroço de algodão, milho, tricô, cevada, arroz, cal em pó e malte	F = 0,4
B	Materiais não abrasivos de densidade média de até 0,8 t/m ³	Alúmen fino, pó de carvão, grafite em pó, cal hidratada café, cacau, soja, milho em grãos, farelo e gelatina em grãos.	F = 0,6
C	Materiais semi-abrasivos de densidade entre 0,6 e 1,12 t/m ³	Alúmen em pedras bórax, carvão grosso, linhito, cinzas, sal grosso, barrilha, lama sanitária, sabão em pó, cevada úmida, amido, açúcar refinado, cortiça moída, leite em pó e polpa de celulose.	F = 1,0
D	Materiais semi-abrasivos ou abrasivos, finos, granulares ou em pedaços misturados com finos, densidade entra 0,8 e 1,6 t/m ³	Bauxita (1,8), negro de fumo (1,6), cimento (1,4), giz (1,4), gesso (1,6), argila (2,0), fluorita (2,0), óxido de chumbo (1,0), cal em pedra (1,3), calcário (1,6), fosfato ácido com 7% de umidade (1,4), areia seca (2,0) xisto britado (1,8)	F = 1 a 2
E	Materiais abrasivos de escoamento difícil.	Cinzas (4), fuligem (3,5), quartzo em pó (2,5), areia e sílica (2,0).	F = 2 a 4

Fonte: adaptado de Gomide (1983, p. 146-147)

Para determinar a potência necessária do rotor, utiliza-se a Equação 10.

$$P = C \cdot \left(\frac{L \cdot F}{273} + \frac{H}{152} \right) \quad (10)$$

Onde: P = potência requerida (HP). Se o resultado encontrado for menor do que 2 HP, multiplica-se por 2, se for inferior a 4 HP, multiplica-se por 1,5; C = Capacidade (t/m³); L = comprimento do transportador (m). Se o comprimento for superior a 30 m, é necessário acrescentar de 10 a 15% na potência necessária; F = fator de potência; H = elevação (m).

2.4.2 Transportadores pneumáticos

Os transportadores pneumáticos também apresentam amplo emprego em vários tipos de indústrias, pois se destacam em algumas características, como a grande versatilidade de produtos transportados, baixo custo de manutenção e operação, segurança de produtos alimentícios e flexibilidade de projetos. O funcionamento destes equipamentos é baseado na introdução de um fluxo de gás a uma velocidade constante, esta corrente de fluido gasoso responsável pela fluidização é comumente composta de ar ou gás inerte (BORTOLAIA, 2008).

É possível citar como principais vantagens de um transportador pneumático: praticidade no transporte e movimentação de sólidos particulados, limpeza, mobilidade, segurança do produto e do operador. As desvantagens deste tipo de sistema são: alto custo de energia, limitação de umidade do material e entupimentos devido a paradas do fluxo de ar (NONNENMACHER, 1983).

No projeto, desenvolvimento e aplicação de dispositivos pneumáticos exige-se o conhecimento de determinadas variáveis atuantes no sistema, como: pressão; quantidade e velocidade do fluxo de ar; potência exigida; e características físicas do material transportador, sendo que cada detalhe citado influencia no desempenho do equipamento (MAGALHÃES, 2003). Em determinados casos, onde o material a ser transportado for muito úmido, possuir massa volumétrica muito elevada, alta temperatura do material e/ou particulados frágeis que possam sofrer alguma mudança de aspecto, não é aconselhável o emprego de dispositivos pneumáticos para o transporte (SILVA, 2005).

Os dispositivos pneumáticos são compostos por diversos componentes, os quais são responsáveis por funções específicas, onde o emprego simultâneo destes equipamentos realiza o funcionamento pleno de um transportador pneumático (BORTOLAIA, 2008; DICKNOW, 2013).

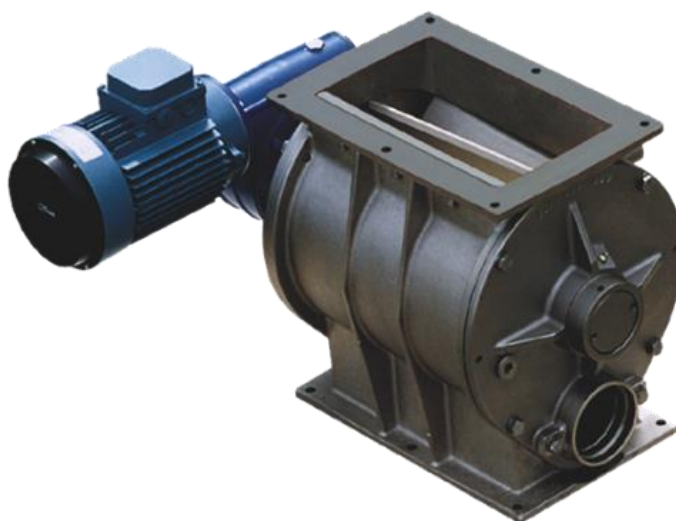
Podem-se citar como principais dispositivos:

- Válvula rotativa;
- Equipamentos geradores de pressão ou vácuo;
- Tubulações;
- Coletores.

2.4.2.1 Válvulas rotativas

A válvula rotativa (Figura 10) é um dispositivo essencial em sistemas pneumáticos, uma vez que realiza a alimentação forçada na linha transportadora e descarga controlada do particulado no coletor. O equipamento possui um eixo giratório com palhetas, e a movimentação do rotor proporciona o abastecimento e retirada do material da linha de transporte. Essas características evitam entupimentos e sobrecarga de material nos dutos de transporte. A taxa de carregamento de sólido é controlada pela alteração do número de rotações da válvula, proporcionando praticidade quanto a necessidades de ajustes de vazão (GOMIDE, 1983).

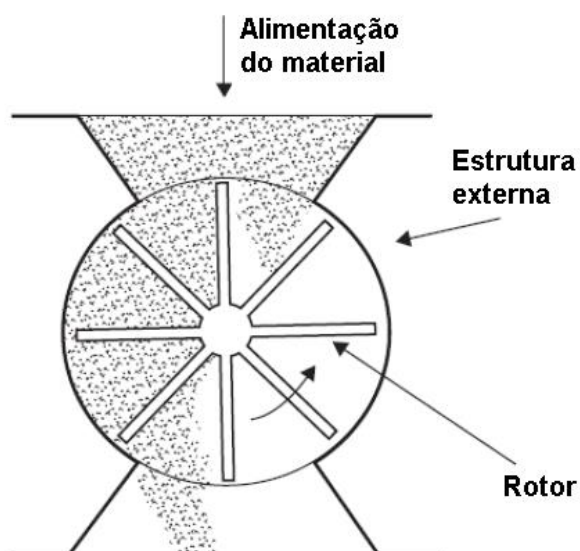
Figura 10 – Imagem ilustrativa de uma válvula rotativa



Fonte: Padix (2018).

Outra funcionalidade deste equipamento é equalizar a pressão entre a sucção e a descarga do sistema de transporte. A válvula é composta basicamente por um corpo metálico que envolve um rotor, conforme mostrado na Figura 11, sendo que o material constituinte do equipamento pode ser ferro fundido, aço carbono, alumínio, bronze, inox, ebonite, PVC e plástico reforçado com fibra de vidro (GOMIDE, 1983; MILLS, 2004).

Figura 11 - Representação das principais partes de uma válvula rotativa



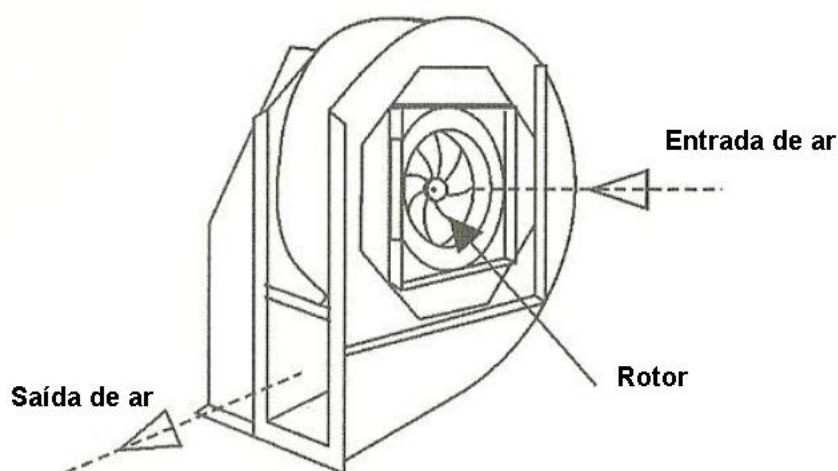
Fonte: adaptado de Mills (2004, p. 58).

2.4.2.2 Equipamentos geradores de pressão ou vácuo

Os dispositivos responsáveis pela movimentação do material particulado na linha de transporte são os chamados ventiladores ou compressores. Estes equipamentos têm por finalidade fornecer a vazão e estabelecer a pressão necessária ao fluxo de fluido para realizar a movimentação do particulado ao longo das tubulações. Dependendo do tipo de transportador pneumático, pode-se optar pelo uso de determinado ventilador ou compressor. Os principais tipos usados para sistemas pneumáticos são os ventiladores centrífugos ou multiestágios (SILVA, 2005).

Os ventiladores centrífugos realizam a aspiração do ar a partir do rotor e ejetam o fluido perpendicular ao eixo de aspiração pelo bocal de descarga. Se o ar aspirado pelo equipamento estiver isento de poeira ou particulados, este sistema de compressão pode alcançar rendimento de 70 a 90%. Porém, se existir poeiras e/ou particulados ou ainda se o sistema de transporte for de configuração direta, deve-se tomar cuidado com os sólidos abrasivos, neste caso o rendimento do sistema cai e fica entre 50 a 70% (SILVA, 2005). A Figura 12 mostra a imagem de um ventilador centrífugo.

Figura 12 – Imagem ilustrativa de um ventilador centrífugo

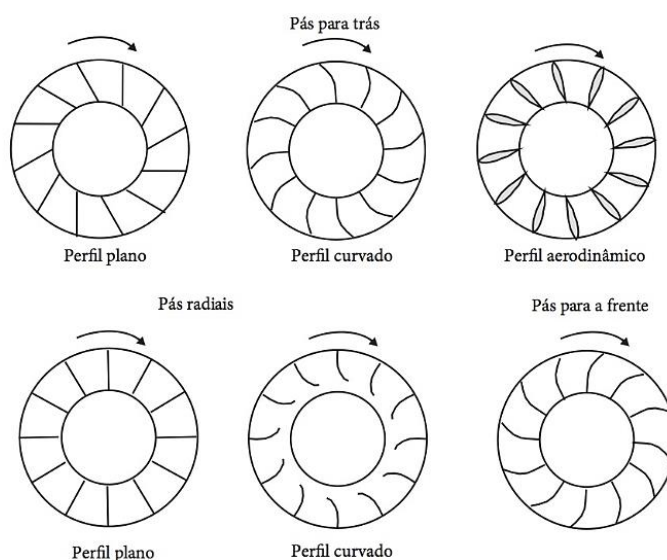


Fonte: adaptado de Dicknow (2013, p. 25).

Segundo Felippo Filho (2015), os ventiladores centrífugos apresentam diferentes configurações com relação ao formato das pás, subdividindo-se em três

categorias: pás inclinadas para trás, pás radiais e pás inclinadas para frente. A Figura 13 mostra uma representação dessas configurações.

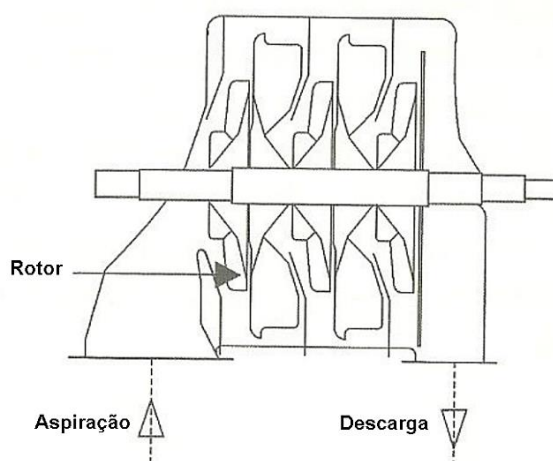
Figura 13 - Configuração do formato de pás utilizadas em ventiladores centrífugos



Fonte: Felippo Filho (2015).

Em sistemas onde as pressões de operação são mais elevadas e com maior capacidade de transporte de sólidos utiliza-se para este fim os ventiladores multiestágios, conforme mostra a Figura 14. Esses equipamentos, além de atuarem em condições de transporte em fase diluída, são capazes de gerar maiores pressões, possibilitando o aumento da taxa de carregamento de materiais particulados no sistema pneumático e com isso, transportar o sólido particulado em “blocos” ao longo das tubulações, o que caracteriza o transporte pneumático em fase densa.

Figura 14 – Imagem ilustrativa de um ventilador multiestágios



Fonte: adaptado de Dicknow (2013, p. 25).

2.4.2.3 Tubulações

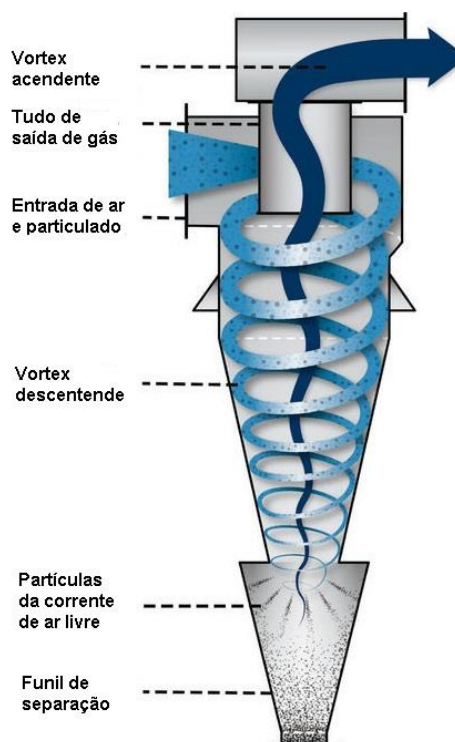
As tubulações do transportador pneumático têm a função básica de conduzir a mistura de ar e sólido particulado desde a entrada até a descarga do sistema. O dimensionamento da tubulação é fator crucial para o ótimo funcionamento do dispositivo, pois as características e dimensões do transportador influenciam diretamente o transporte do material e consequentemente a perda de carga gerado ao longo da tubulação e demais acessórios. O objetivo é manter um fluxo de ar a uma velocidade uniforme ao longo do trajeto, com isolamento adequado e perfeito alinhamento das seções internas (MILLS, 2004; NONNENMACHER, 1983).

Quanto à utilização de acessórios, curvas, cotovelos e válvulas nas linhas de transporte, é necessária atenção para que essas instalações não causem saliências abruptas, ocasionando acúmulo de sólido, obstruções e perda de carga excessiva. Outras variáveis importantes são a espessura e o tipo de material utilizado na construção da tubulação. A escolha do material deve ser baseada nas características do particulado a ser transportado dando atenção para sólidos abrasivos, uma vez que esses causam excessivo desgaste e consequentemente constante substituição de tubulações, acessórios e equipamentos (MILLS, 2004).

2.4.2.4 Coletores

Os dispositivos destinados a recolher o sólido no final da linha de transporte pneumático são chamados de coletores. É possível empregar diferentes equipamentos para tal finalidade. Para sólidos finos tipicamente maiores que 5 μm , utilizam-se ciclones ou filtros de mangas; quando tem-se o descarregamento de sólidos de diâmetro intermediário ou particulados grosseiros, pode-se utilizar o próprio silo de estocagem ou adotar a utilização de câmara gravitacional (GOMIDE, 1983). O ciclone, mostrado na Figura 15, é o equipamento coletor de maior emprego em transportadores pneumáticos.

Figura 15 - Sistema coletor do tipo ciclone



Fonte: Direct Industry (2018).

Este tipo de coletor consiste em uma câmara de sedimentação na qual o campo gravitacional é substituído pelo centrífugo. A mistura de ar e sólido entra na câmara do ciclone e o material particulado percorre uma trajetória helicoidal até atingir a região cônica do equipamento. Quando o material chega ao fundo do trecho cônico acontece o descarregamento (GOMIDE, 1980).

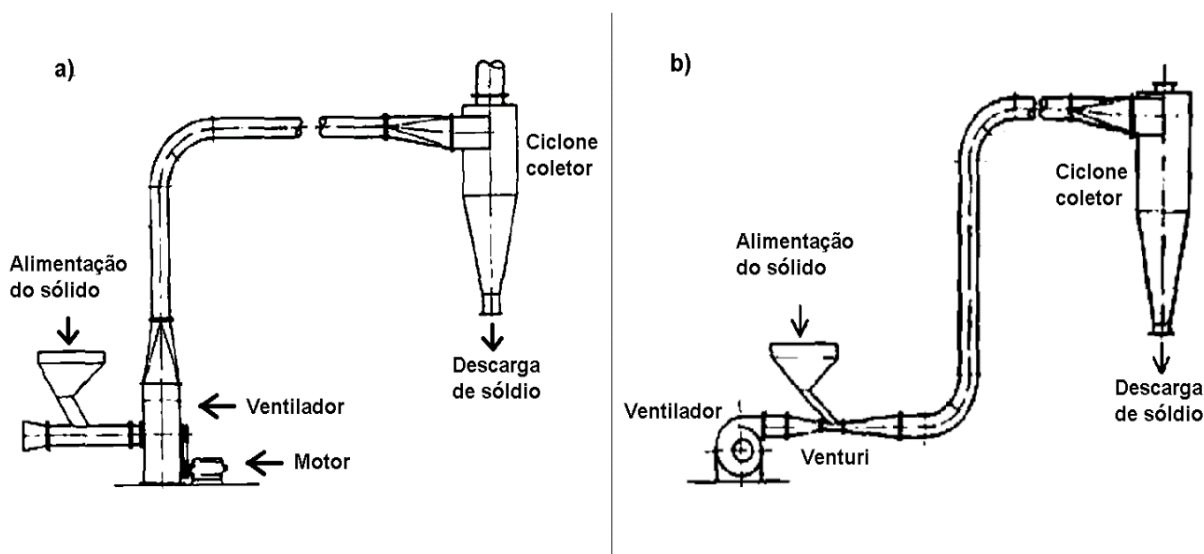
O coletor do tipo ciclone possui uma eficiência de 85 % (em peso) e opera com uma perda de carga de 15 a 150 milímetros de coluna d'água (mm C.A). Esse

dispositivo tem como vantagens o baixo custo de construção e instalação, simplicidade de operação, exigência de pouca manutenção e versatilidade, podendo ser adaptado em diversas operações. As desvantagens desse sistema são a baixa eficiência de operação com partículas muito finas e possibilidade de entupimento quando utilizado na separação de partículas higroscópicas e aderentes (GOMIDE, 1980).

2.4.2.5 Características e configurações de transportadores pneumáticos

Segundo Gomide (1983), é possível caracterizar o sistema pneumático quanto à configuração e atuação do ventilador ou compressor. A Figura 16 mostra os tipos de configuração existentes.

Figura 16 - Transportador pneumático de configuração direta (a) e indireta (b)

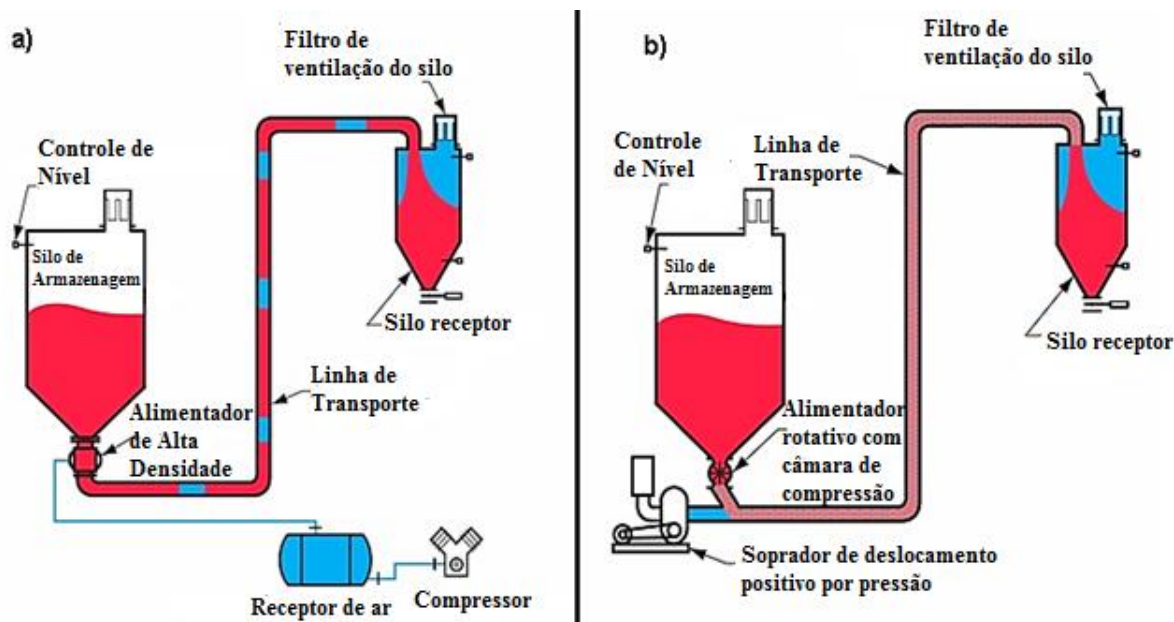


Fonte: adaptado de Gomide (1983, p. 166 – 167).

Quando o material particulado passa através do ventilador ou compressor, o sistema é de uso direto, conforme mostrado na Figura 16-a. Para sistemas indiretos, o sólido não passa diretamente pelo ventilador, como mostra a Figura 16-b. Entre os dois sistemas citados, o sistema de transporte direto tem maior aplicabilidade em indústrias, pois é mais simples de projetar, instalar e operar. A sua desvantagem é que não pode ser empregado em casos onde o material particulado pode danificar ou ocasionar gastos excessivos no ventilador.

Além da configuração direta ou indireta do sistema pneumático, estes equipamentos podem operar em fase densa ou diluída. A Figura 17 mostra estes dois tipos de transporte.

Figura 17 - Transportador pneumático em fase densa (a) e fase diluída (b)



Fonte: Dynamic Air®(2018).

Os transportadores de fase densa (Figura 17-a) operam com altas cargas de carregamento, altas pressões e baixas velocidades de transporte. Nestes dispositivos é comumente utilizada uma válvula dosadora ou vaso de pressão para introduzir o material destinado ao transporte. Para os dispositivos que operam em fase diluída, mostrado na Figura 17-b, empregam-se baixas cargas de carregamento, fluxo de ar de alta velocidade, baixa pressão ou vácuo. Estas características fazem com que o material presente na linha de transporte se encontre em estado de fluidização (DICKNOW, 2013).

No Quadro 3 é possível observar um comparativo entre as características do transporte pneumático de fase densa e diluída.

Quadro 3 - Comparativo das características de transportadores pneumáticos de fase densa e diluída

Características de comparação	Fase Densa	Fase Diluída
O produto para os quais os sistemas melhor se aplicam	Pó ou granulado – abrasivos, frágeis, misturas em bateladas (minimizar segregação),	Pó ou granulados – Não abrasivos, não frágeis, de baixa densidade

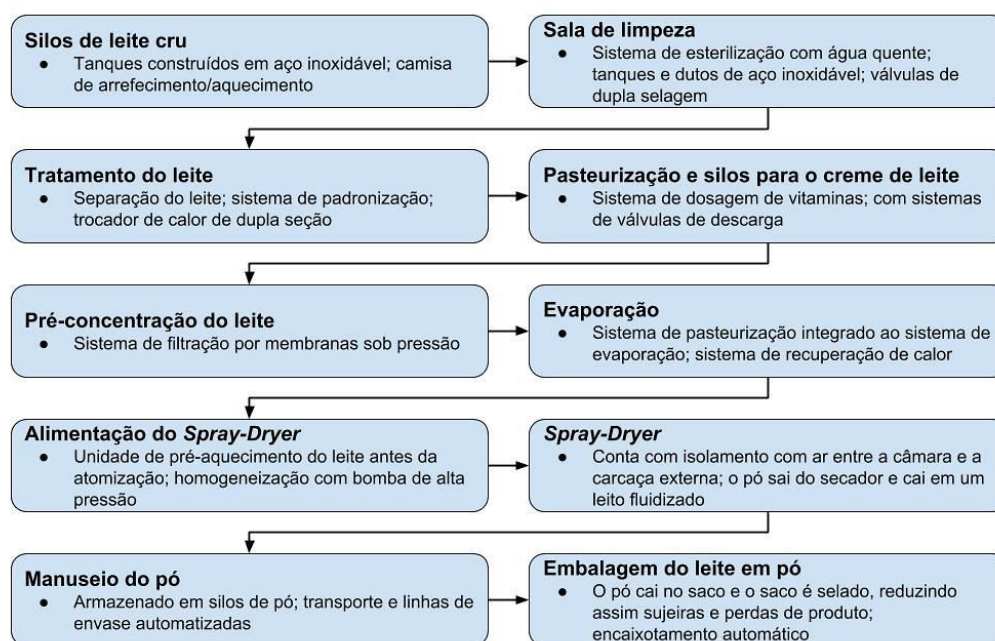
	pesados, higroscópicos.	
Velocidade de transporte	Baixa de 0,1 a 2 m/s, utilizando-se vase de pressão	Alta, acima de 23 m/s utilizando-se sopradores tipo Roots ou sopradores centrífugos
Relação pressão e vazão de ar	Pressões relativas altas (acima de 103 kPa) e baixa vazão de ar	Pressões baixas inferior a 103 kPa e alta vazão ar
Vazão de matéria transportado	Mais alto comparado aos outros sistemas	Mais baixo comparado aos outros sistemas
Desgaste de equipamento	Baixo índice de desgaste na tubulação, diminuição do desgaste das curvas devido à baixa velocidade de transporte	Alto índice de desgaste de tubulação e altíssimo índice de desgaste das curvas devido à alta velocidade de transporte
Custo de implantação	Mais alto comparado aos outros sistemas	Mais baixo comparado aos outros sistemas
Custo de manutenção	Mais baixo comparado aos outros sistemas	Mais alto comparado outros sistema

Fonte: Adaptado de Dicknow (2013, p. 17).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado em uma indústria de laticínios que conta com três unidades distribuídas pelo Brasil, localizadas nas cidades de Estrela (RS), Vila Velha (ES) e Queimados (RJ). A unidade localizada na cidade de Estrela, a qual é o foco do trabalho, tem produção voltada para o leite em pó. A Figura 18 apresenta um fluxograma evidenciando cada etapa do processo de fabricação do leite em pó e suas principais características

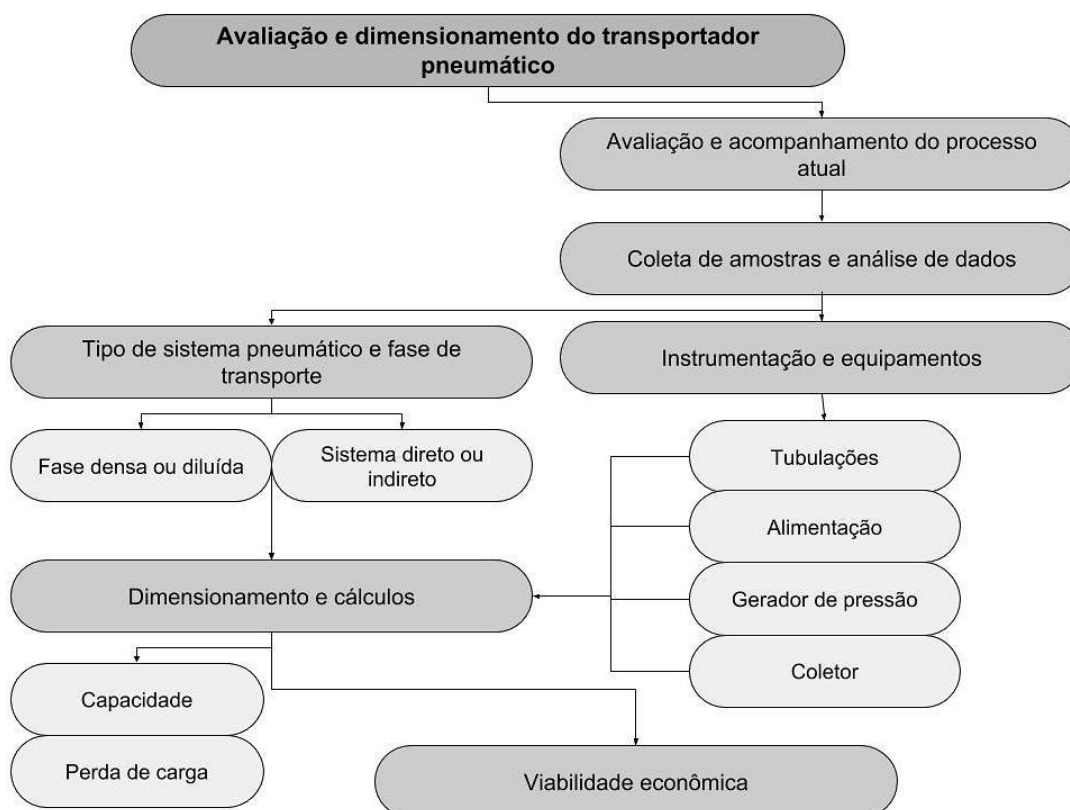
Figura 18 - Fluxograma de uma planta industrial de produção de leite em pó



Fonte: Do autor (2018).

Os objetivos deste trabalho se enquadram nas duas últimas etapas apresentada na Figura 18 (Manuseio do pó e Embalagem do leite em pó). A avaliação e dimensionamento do novo sistema de transporte de leite em pó destinado à distribuição do produto final até as linhas de envase foi realizado por etapas, sendo melhor detalhadas na Figura 19.

Figura 19 - Metodologia das etapas seguidas no trabalho em organograma

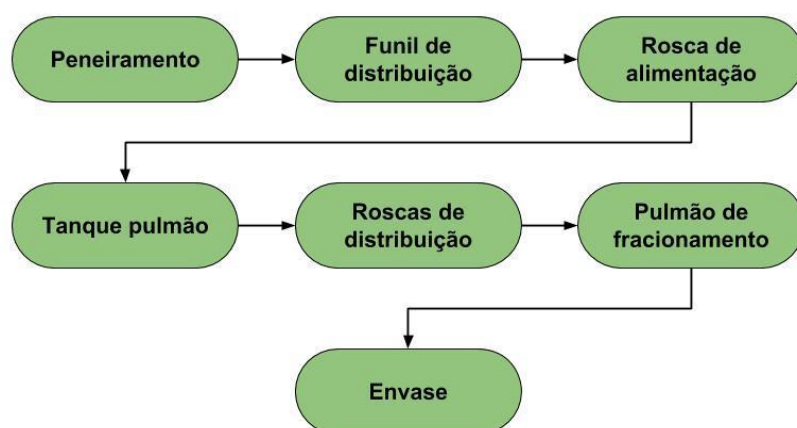


Fonte: Do autor (2018).

3.1 Sistema de transporte atual

A etapa final do processamento do leite em pó na indústria é o transporte do material particulado e o envase do produto. Na empresa em questão, o transporte do leite em pó até o sistema de envase e embalagem final ocorre por meio de roscas helicoidais, sendo ineficiente e apresentando problemas no transporte. Este processo de transporte e envase do leite em pó realizado pela empresa pode ser representado pelo fluxograma mostrado na Figura 20.

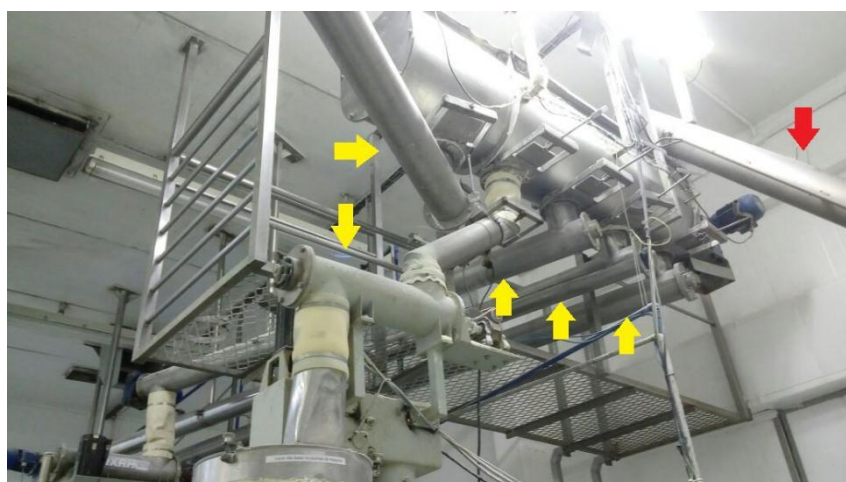
Figura 20 - Fluxograma do processo de envase do leite em pó utilizado atualmente pela empresa



Fonte: Do autor (2018).

O peneiramento consiste em reter os aglomerados de leite em pó provenientes do leite fluidizado do secador, onde o objetivo é que não passem particulados grosseiros, os quais são indesejáveis para o produto final e também podem danificar os demais equipamentos. Posterior ao peneiramento, o material vai para um funil de distribuição, onde é destinado à rosca de alimentação principal (indicado por seta vermelha), conforme mostra Figura 21. Esse transportador helicoidal alimenta um tanque pulmão do qual saem outras cinco roscas de distribuição (indicados por setas amarelas). Esses helicoides têm por objetivo levar o leite em pó aos pulmões de fracionamento (Figura 22), que alimentam então às linhas de envase do produto final.

Figura 21 - Transporte helicoidal principal, tanque pulmão e roscas de distribuição



Fonte: Do autor (2018).

Figura 22 - Pulmões de fracionamento que alimentam o sistema de envase do leite em pó



Fonte: Do autor (2018).

3.2 Análise das características do leite em pó

Para o dimensionamento do novo sistema de transporte pneumático, é necessário realizar algumas caracterizações do sólido: análise granulométrica e densidade aparente do material. Para fins de caracterização do material particulado, foram coletadas amostras do leite em pó após a etapa de peneiramento.

Estes parâmetros citados têm grande importância no processo, uma vez que estão relacionadas com os cálculos de dimensionamento e o regime fluidodinâmico do sistema de transporte (CREMASCO, 2012).

A realização do estudo granulométrico do leite em pó baseou-se na técnica de imagem obtida através do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Foi realizada análise da morfologia das partículas do leite em pó utilizando o microscópio eletrônico de varredura da marca SHIMADZU modelo Superscan SS-500, disponível no Parque Científico e Tecnológico –Tecnovates da Universidade do Vale do Taquari - Univates, com voltagem de 25 kV, sendo as amostras metalizadas com ouro. A distribuição cumulativa e definição do diâmetro médio das partículas foram executados a partir das análises das imagens no *software ImageJ*. Definido os parâmetros, utilizou-se a Equação 5 para calcular o Diâmetro de Sauter, o qual foi então utilizado nos cálculos de dimensionamento do transportador pneumático.

3.3 Dimensionamento do transportador pneumático

Segundo Gomide (1983), para o dimensionamento de um transportador pneumático é necessário a especificação da capacidade de transporte C (t/h), massa específica aparente ρ_{pa} (t/m³) e o diâmetro médio de Sauter D_p (mm), bem como definir o *layout* do transportador, curvas, válvulas e equipamentos coletores.

Os principais parâmetros calculados são: “Diâmetro do transportador D_t (mm), a vazão Q_g (m³/s) do ar de transporte, a perda de carga total ΔP (kg/m²) do sistema e a potência P_v (HP) do ventilador ou soprador” (GOMIDE, 1983, p. 168).

Inicialmente define-se a velocidade de transporte do sistema pneumático, conforme a Equação 11, a qual é originada da soma da velocidade de flutuação do sólido num trecho vertical e a velocidade do material.

$$V = 4,11\sqrt[3]{\rho_{pa}}\sqrt{D_p} + 23,4\sqrt{\rho_{pa}} \quad (11)$$

Onde: V = velocidade de transporte (m/s); ρ_{pa} = densidade aparente do material (t/m³); D_p = Diâmetro médio de Sauter (mm).

Definida a velocidade de transporte, pode-se calcular o diâmetro do transportador a partir da Equação 12.

$$D_t = 3016 \frac{\sqrt{C}}{V^{0,98}} \quad (12)$$

Onde: D_t = diâmetro do duto (mm); C = capacidade do sistema (t/h); V = velocidade de transporte (m/s).

O próximo parâmetro a ser definido para o sistema é a perda de carga por atrito. Para calcular esta condição do transportador pneumático é necessário conhecer o comprimento total do transportador (Equação 13), vazão do ar (Equação 14) e a concentração de sólido transportado (Equação 15).

$$L_t = L_h + 2L_v + L_e \quad (13)$$

Onde: L_t = comprimento total (m); L_h = comprimento total dos trechos horizontais (m); L_v = comprimento total dos trechos verticais (m); L_e = comprimento equivalente das curvas, válvulas e demais conexões (m).

$$Q_g = \frac{V \times D t^2}{1,27 \times 10^6} \quad (14)$$

Onde: Q_g = vazão de ar (m^3/s); V = velocidade de transporte (m/s); Dt = diâmetro do duto (mm).

$$X = \frac{C}{4,29 \times Q_g} \quad (15)$$

Onde: X = concentração em peso de sólido transportado (kg de sólido/ kg de ar); C = capacidade do transportador (t/h); Q_g = vazão de ar (m^3/s).

Para definir o comprimento equivalente (L_e) das curvas e conexões, utiliza-se a Tabela 3, que relaciona o diâmetro do duto de transporte com este parâmetro.

Tabela 3 - Relação do diâmetro do duto com o comprimento equivalente

D (mm)	L_e (m)
50	1,4
100	2,6
125	3,6
150	4,4
175	5,4
200	6,2
250	8,6
300	10,4
400	14,0

Fonte: Adaptado de Gomide (1983, p. 171).

Para calcular a perda de carga total do sistema pneumático, utiliza-se a Equação 16, a qual relaciona a perda de carga por atrito, por aceleração e demais equipamentos utilizados no transportador, principalmente dispositivos responsáveis pela coleta do material no final da linha de transporte.

$$\Delta P_t = \left[1,68 \times L_t (X + 3,5) \frac{V^{1,8}}{D^{1,22}} + 0,138 \times \varphi_p \times X \times V^2 + \Delta P_e \right] \times 10^{-4} \quad (16)$$

Onde: ΔP_t = perda de carga total (kg/cm^2); L_t = comprimento total (m); X = concentração em peso de sólido transportado (kg de sólido/ kg de ar); V = velocidade de

transporte (m/s); D = diâmetro dos dutos (mm); φ_p = fator de redução da perda de carga por aceleração; ΔP_e = perda de carga nos equipamentos (mmca).

A Tabela 4 mostra a relação de alguns equipamentos coletores com as respectivas perdas de carga geradas.

Tabela 4 - Relação do equipamento coletor e a perda de carga gerada no transportador pneumático

Equipamento de coleta	Perda de carga (mmca)
Câmara gravitacional	20 a 40
Ciclone comum	30 a 60
Ciclone de alta eficiência	70 a 150
Câmaras de impactação	40 a 100
Filtros de tecidos	80 a 150

Fonte: Adaptado de Gomide (1983, p. 171).

É necessário esclarecer qual valor deve ser utilizado para o fator de redução da perda de carga por aceleração, uma vez que dependendo do tipo de transportador empregado o valor para esta variável pode variar. Com isso, empregam-se valores de $\varphi_p = 1$, quando o sistema tiver a alimentação de material à linha de transporte depois do ventilador, ou seja, sistema de transporte de característica indireta. Para sistemas pneumáticos onde a alimentação de sólido acontece antes do ventilador, utiliza-se valores de $\varphi_p = 0,5$. Há um terceiro caso onde se considera $\varphi_p = 0$, usualmente empregado em transportadores com a alimentação próximas ao bocal de aspiração, característica comum de sopradores do tipo Venturi (GOMIDE, 1983).

Na utilização de um soprador com garganta do tipo Venturi para alimentar o sistema pneumático, deve-se considerar uma perda de carga na garganta 3/2 vezes a perda de carga total do sistema, uma perda de carga gerada pela aceleração do material e uma perda de carga 5 a 10 % entre a garganta e o ventilador. Essas condições originam a Equação 17.

$$\Delta P_v = \left\{ \left[\frac{3}{2} \Delta P_t + \left(\frac{v}{4,043} \right)^2 \right] \div n \right\} \times 10^{-4} \quad (17)$$

Onde: ΔP_v = perda de carga na garganta do Venturi (kg/cm^2); ΔP_t = perda de carga total (kg/cm^2); V = velocidade de transporte (m/s); n = fator da perda de carga entre a garganta e o ventilador, valor que pode variar de 0,90 a 0,95.

Após finalizar os cálculos de perda de carga total gerados no transportador pneumático, calcula-se a potência requerida pelo ventilador ou soprador a partir da Equação 18.

$$P_v = 131,51 \times Q_g \times \Delta P_t \quad (18)$$

Onde: P_v = potência do ventilador ou soprador (hp); Q_g = vazão de ar (m^3/s); ΔP_t = perda de carga total (kg/cm^2).

Em casos onde se utilizam sistemas de alimentação direta, na qual o material particulado passa pelo ventilador, é necessário ter um acréscimo de 25% na potência requerida, devida à aceleração das partículas no ventilador.

Para dimensionar o tanque pulmão de alimentação do transportador pneumático, bem como os tanques de recebimento e envase, inicialmente calcula-se o volume destes silos utilizando a Equação 19. Uma vez definido o volume e conhecendo a altura ou diâmetro do tanque, é possível definir os demais parâmetros a partir da Equação 20, uma vez que os silos serão baseados na geometria de um cilindro.

$$V_t = \frac{C}{\rho_{pa}} \quad (19)$$

Onde: V_t = volume de tanque (m^3); C = capacidade do sistema (t/h); ρ_{pa} = densidade aparente do sólido (t/m^3).

$$V_c = \pi r^2 \times H \quad (20)$$

Onde: V_c = volume de um cilindro (m^3); r^2 = raio da base do cilindro (m); H = altura do cilindro (m).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

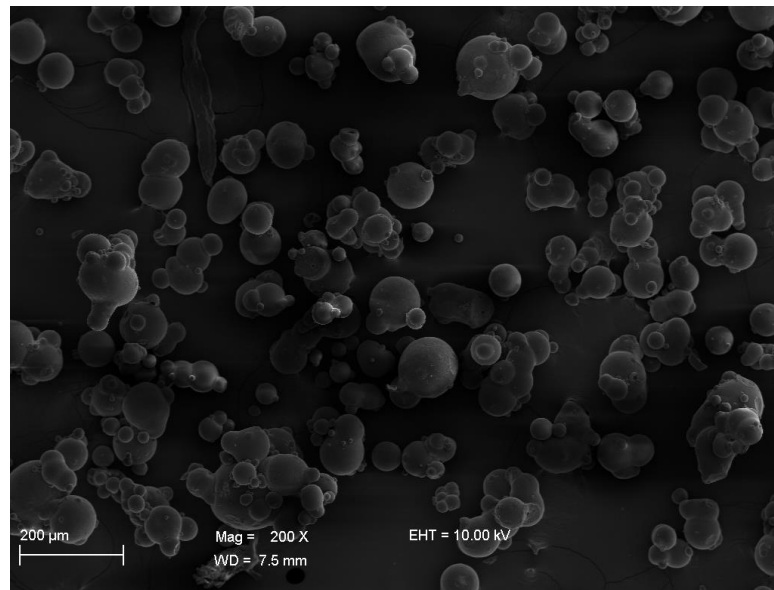
Para dar início ao dimensionamento do novo sistema de transporte pneumático proposto, inicialmente foi necessário realizar o levantamento de alguns dados essenciais ao projeto, como capacidade do sistema, densidade aparente e diâmetro médio da partícula de leite em pó.

A capacidade do sistema de transporte pneumático foi baseada na utilização de 100% da produtividade da indústria de leite em pó, sendo esta capacidade de produção de aproximadamente 2,5 t/h de leite em pó.

Com relação à densidade aparente do leite em pó, foi possível estimar este parâmetro fundamentado em Tuohy (1989), onde considerou-se um valor de 0,62 t/m³.

Para determinar o diâmetro médio, realizou-se a análise de MEV das amostras coletadas no funil de distribuição. A Figura 23 apresenta uma micrografia das partículas do leite em pó.

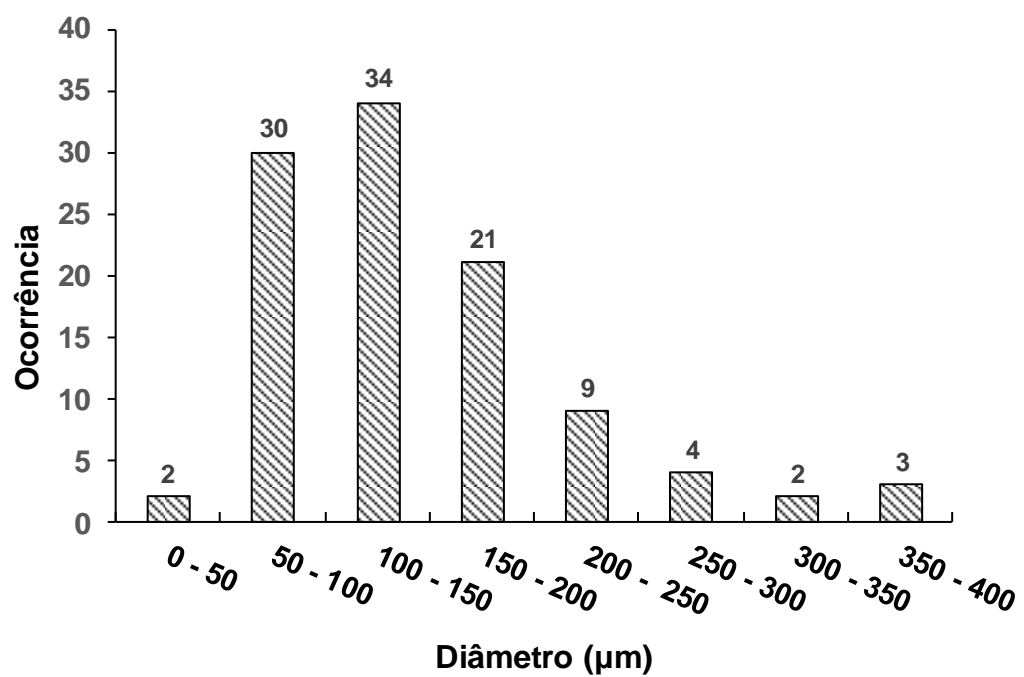
Figura 23 - Análise morfológica do leite em pó por MEV



Fonte: Do autor (2018).

Com a utilização do *software ImageJ*, foi possível determinar a ocorrência de partículas de diâmetros que variam entre 45 e 400 µm, conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Distribuição de frequência de diâmetros das partículas.



Fonte: Do autor (2018).

É possível observar que a maior ocorrência de diâmetros das partículas se encontra na faixa de 50 a 200 μm , e a partir da análise morfológica do leite em pó foi possível estimar o diâmetro médio das partículas, sendo este de aproximadamente 145 μm .

Com base no diâmetro médio da partícula de leite em pó, densidade aparente e capacidade produtiva, realizou-se os cálculos de dimensionamento relacionados às seguintes variáveis do transportador pneumático: velocidade de transporte (V), diâmetro do duto (Dt), comprimento total (Lt), vazão de ar (Qg), concentração em peso de sólido transportado (X), perda de carga no duto (ΔPt) e potência do ventilador (Pv), sendo estes dados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Características de projeto do transportador pneumático

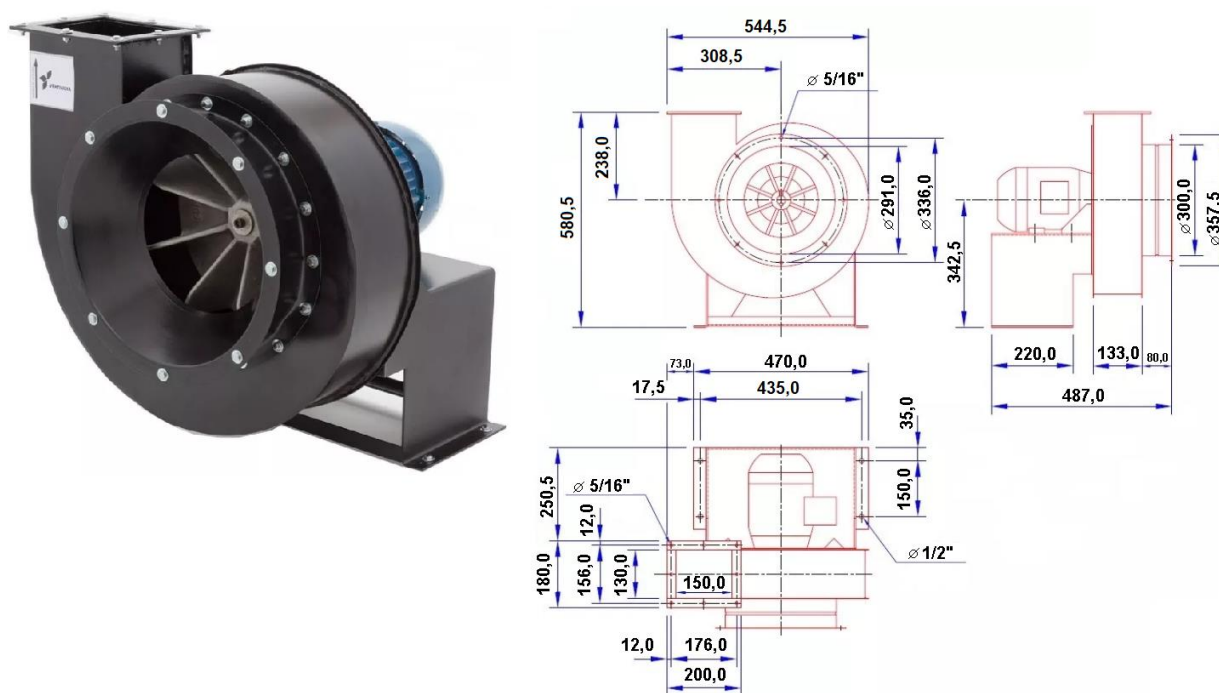
V (m/s)	Lt (m)	Dt (mm)	Qg (m ³ /s)	X (kg de sólido / kg de ar)	ΔPt (mm Ca)	Pv (hp)
18,47	61,10	273,73	1,09	0,53	148,99	2,13

Fonte: Do autor (2018).

Com base na velocidade de transporte, é possível definir o regime de escoamento do material particulado ao longo do transportador. Conforme Mills (2004), transportadores pneumáticos que atuam em fase diluída apresentam velocidade de transporte na faixa de 12 a 25 m/s. Dessa forma, pode-se afirmar que o transportador pneumático deste projeto atuará em fase diluída, uma vez que a velocidade de transporte será de 18,47 m/s.

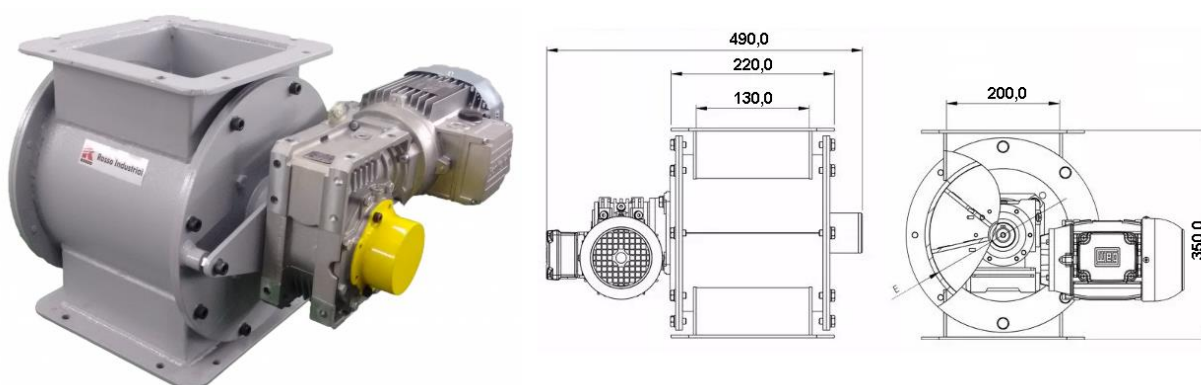
As variáveis relacionadas à vazão de ar, potência do ventilador e capacidade do sistema definem a escolha de importantes dispositivos, sendo responsáveis pela movimentação, abastecimento e descarga do sólido. Tendo conhecimento das características do transportador proposto, buscam-se com fornecedores equipamentos comerciais que melhor atendessem as necessidades e demandas pré-determinadas para o projeto. Dessa forma, foi possível definir ventiladores centrífugos e válvulas rotativas para o sistema de transporte. Os dispositivos, bem como suas dimensões estão apresentados nas Figuras 25 e 26 respectivamente.

Figura 25 - Ventilador centrífugo.



Fonte: Ventisilva (2018).

Figura 26 - Válvula rotativa.

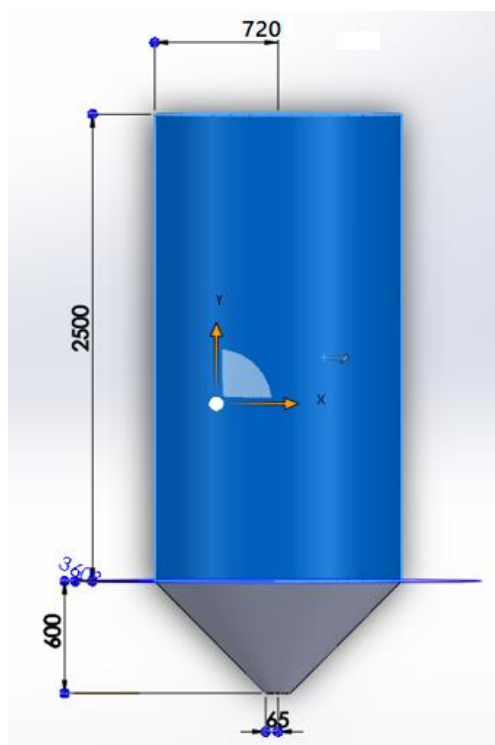


Fonte: Rosso (2018).

A próxima etapa do dimensionamento dos equipamentos consistiu na determinação da altura, diâmetro e volume do tanque pulmão para a linha de distribuição de leite em pó. Com base na Equação 19, obteve-se o volume do silo de distribuição, sendo este de aproximadamente 4,03 m³. A partir deste primeiro parâmetro e considerando determinados aspectos de *layout* construtivos e limitações da indústria

de leite em pó, uma vez que a empresa não possui amplo espaço para a distribuição de equipamentos no sentido horizontal, mas sim vertical, definiu-se a utilização de um tanque com altura de 2,5 m. Definido o volume e altura do silo pulmão, foi possível calcular o diâmetro, onde se obteve um valor de aproximadamente 1,44 m. É possível visualizar todas as dimensões do tanque pulmão na Figura 27.

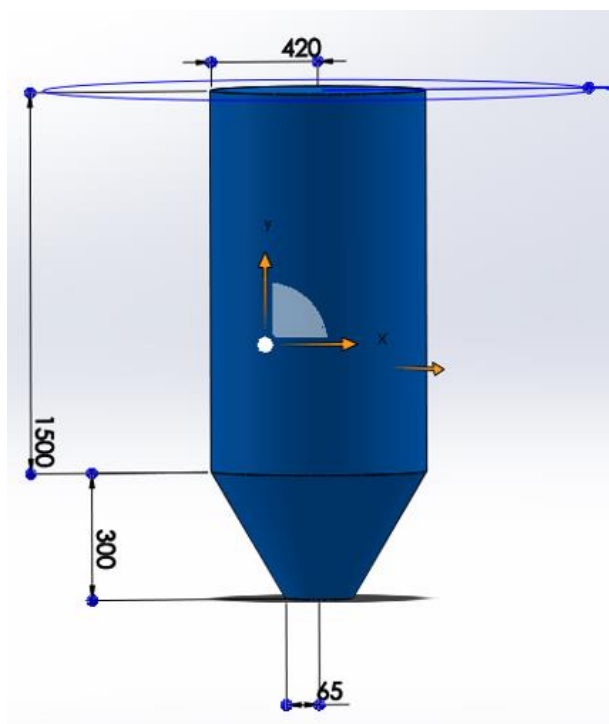
Figura 27 – Imagem com as três dimensões do tanque pulmão de distribuição



Fonte: Do autor (2018).

O dimensionamento dos tanques de recebimento e envase tiveram como base a utilização de cinco silos para o abastecimento de cinco linhas de envase. Para determinar o volume de cada tanque, dividiu-se a capacidade do sistema de 2,5 t/h de leite em pó entre as cinco unidades de envase, dessa forma cada dispositivo de envase comportará 0,5 t/h de leite em pó. Dessa forma, aplicou-se novamente a Equação 19, onde obteve-se o volume de 0,81 m³ para um tanque de envase. Baseado nos mesmos aspectos de layout e limitações da empresa, definiu-se um tanque de abastecimento com 1,5 m de altura, e a partir disso, obteve-se um diâmetro de 0,84 m. Pode-se visualizar as dimensões do tanque de recebimento e envase na Figura 28.

Figura 28 – Imagem em três dimensões do taque de recebimento e envase



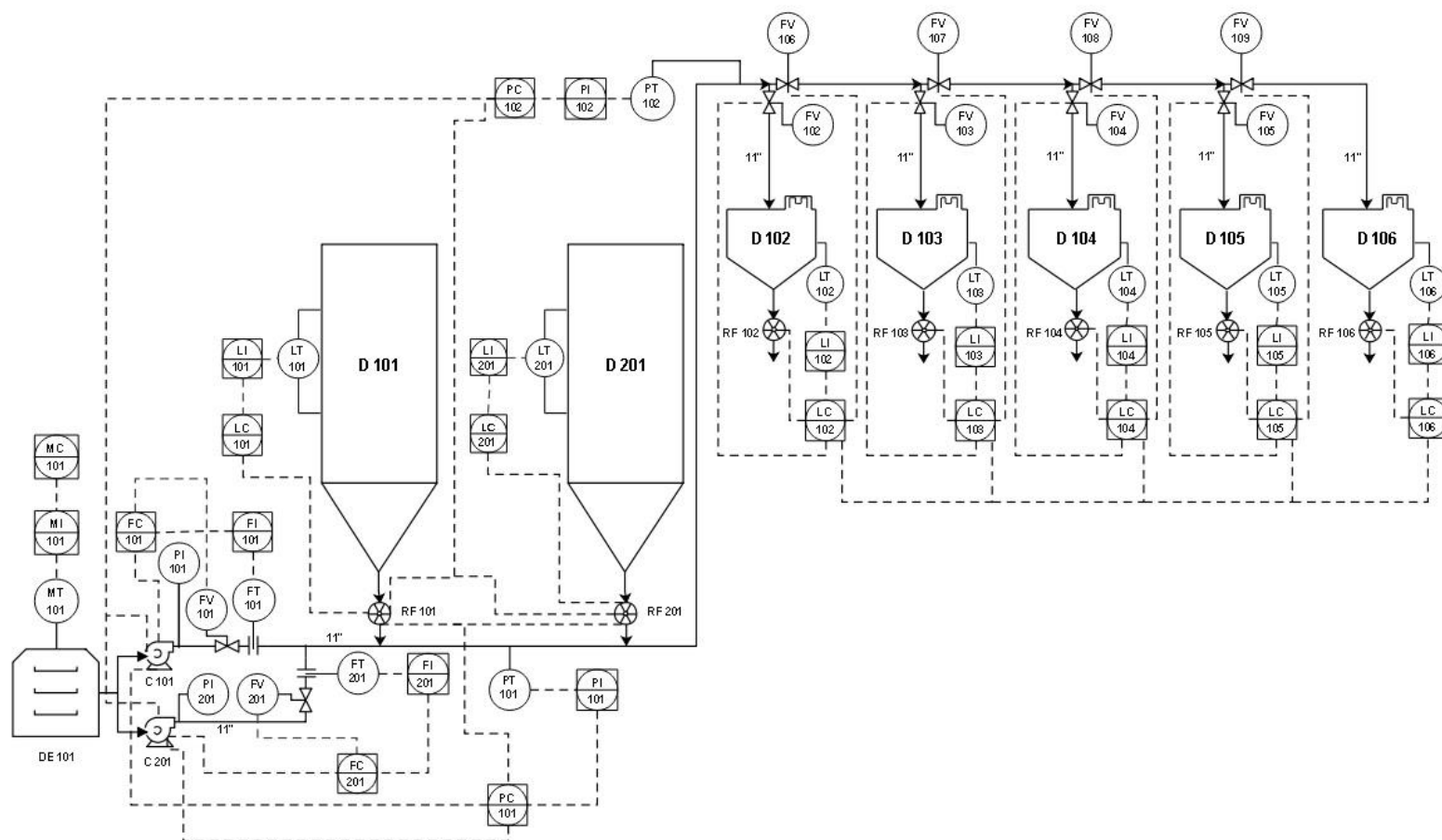
Fonte: Do autor (2018).

Para determinar o material e espessura da chapa na construção dos tanques e dutos de transporte, consultou-se uma empresa a qual fabrica tanques e tubos para indústrias alimentícias. Conforme recomendações desse fabricante, os tanques e dutos podem ser fabricados com aço inox 304, e para a construção dos tanques, seria utilizada uma chapa com espessura de 3/16 polegadas, já para o duto uma chapa com 1/16 polegadas de espessura, o material destes componentes garantiria a qualidade e segurança do produto e processo.

4.1 Detalhamento do processo

Para o entendimento do funcionamento do novo sistema de transporte pneumático proposto, o qual tem por objetivo a movimentação de partículas de leite em pó baseado no deslocamento deste material a partir da saída de um secador de leite fluidizado até sua destinação final às linhas de envase, elaborou-se um diagrama de tubulação e instrumentação (P&ID), conforme mostrado na Figura 29.

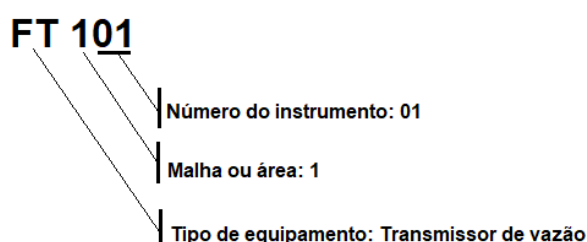
Figura 29 - Diagrama de tubulação e instrumentação do sistema de transporte pneumático



Fonte: Do autor (2018).

A partir de um P&ID é possível evidenciar a disposição de todo e qualquer instrumento responsável pelo controle de variáveis e funcionamento do sistema. Para melhor entendimento, estes dispositivos são identificados por meio de uma identificação funcional do instrumento, conforme Figura 30, também conhecida como tag, que é um código alfanumérico para a identificação de um instrumento presente na planta de processo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983).

Figura 30 - Identificação de um instrumento



Fonte: Do autor (2018).

Para o melhor entendimento dos dispositivos que compõem o projeto do transportador pneumático, são mostrados no Quadro 4 as identificações alfabéticas e descrição de cada tipo de instrumento envolvido na construção do P&ID do novo sistema de transporte.

Quadro 4 - Identificação e descrição dos instrumentos presentes no P&ID

TAG	Descrição
MC	Controlador de umidade
MI	Indicador de umidade
MT	Transmissor de umidade
DE	Desumidificador
FC	Controlador de vazão
FI	Indicador de vazão
FT	Transmissor de vazão
FV	Válvula de vazão

(Continua...)

(Continuação...)

PI	Indicador de pressão
PT	Transmissor de pressão
PC	Controlador de pressão
LI	Indicador de nível
LT	Transmissor de nível
LC	Controlador de nível
RF	Válvula rotativa
C	Compressor
D	Tanque

Fonte: Do autor (2018).

A construção do P&ID apresentado na Figura 29 foi baseada na utilização de duas malhas, uma principal (nº1) e outra secundária (nº2), a função e disposição dos equipamentos na malha secundária é suprir uma eventual falha ou parada de manutenção em determinados equipamentos presentes na malha principal.

O processo de transporte inicia-se no abastecimento do tanque de distribuição D 101, que por sua vez é controlado pelos dispositivos LT, LI e LC 101, instrumentos que realizam o controle de nível de leite em pó no tanque. A válvula rotativa de alimentação RF 101, que está ligada diretamente ao tanque, é responsável pela alimentação do leite em pó à linha pneumática.

Com relação ao fluxo de ar responsável pela movimentação do leite em pó ao longo do sistema de transporte pneumático, o processo inicia-se no equipamento DE 101, que corresponde a um desumidificador de ar. Sugere-se a utilização de um equipamento que retire a umidade do ar, pois a presença de elevada umidade em contato com o leite em pó pode acarretar em problemas de entupimento ao longo do sistema pneumático. O equipamento DE 101 é controlado pelos instrumentos MT, MI e MC 101, que têm por objetivo transmitir, indicar e controlar a umidade do ar de entrada à linha de transporte pneumática.

O fluxo de ar segue para o compressor C 101, o qual tem por função acelerar a entrada de ar no sistema e consequentemente movimentar o material particulado. O fluxo de ar segue para a válvula FV 101 e medidor de vazão FT 101. O medidor

de vazão tem por finalidade transmitir a vazão de ar para um indicador e controlador de vazão, estes instrumentos estão diretamente ligados aos equipamentos C 101 e FV 101, que por sua vez são controlados por estes dispositivos. Estes controles têm por objetivo manter a vazão de ar constante, o que permite melhor rendimento e movimentação de sólidos ao longo do transportador.

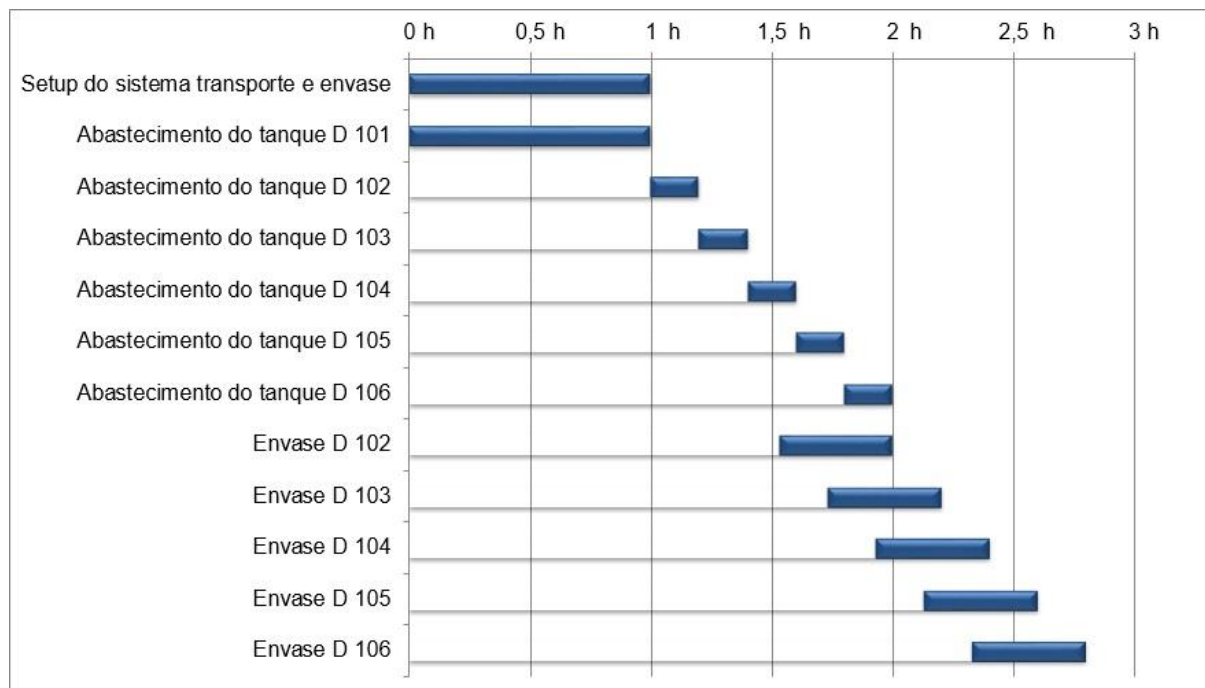
O leite em pó segue então para a etapa de envase, a qual acontece a partir dos tanques D 102, 103, 104, 105 e 106. Nestes recipientes, encontram-se instrumentos que realizam a medição e controle do nível de cada tanque pulmão. O conjunto de válvulas de controle que compreendem as FV 102 à 109, as quais se encontram no topo de cada tanque, são responsáveis por fornecer o abastecimento de leite em pó. As válvulas rotativas RF-102, 103, 104, 105 e 106 são os dispositivos que encaminham o material particulado dos tanques até as células de envase. Pode-se observar que no sistema de envase, os instrumentos controladores de nível são interligados entre si e também com as válvulas de controle, pois dessa maneira se garante o funcionamento e interação entre todos os equipamentos. Este tipo de controle visa que o conjunto de válvulas de controle de vazão funcione como dispositivos que permitam ou não a passagem de leite em pó para determinado tanque.

Previu-se também a utilização de instrumentos que garantem a segurança operacional do sistema de transporte. Os dispositivos PT, PI e PC distribuídos ao longo do duto de transporte são respectivamente equipamentos de transmissão, indicação e controle de pressão. Estes instrumentos têm por função parar o sistema de alimentação de leite em pó e entrada de ar na linha de transporte em casos de variação extrema de pressão. Por este motivo, o conjunto de instrumentos de medição e controle de pressão está diretamente ligado aos exaustores centrífugos e válvulas rotativas.

4.1.1 Tempo de processamento

Para determinar a programação de produção e visualizar o tempo em cada etapa constituinte do processo de transporte e envase do leite em pó, elaborou-se um Diagrama de Gantt, conforme mostrado na Figura 31, para ilustrar os avanços de tempo em cada etapa no novo sistema de transporte pneumático.

Figura 31 - Diagrama de Gantt para o funcionamento do sistema de transporte pneumático.



Fonte: Do autor (2018).

Conforme ilustrado na Figura 31, pode-se visualizar que as etapas de *setup* do sistema de transporte e abastecimento acontecem simultaneamente, isto por que ao mesmo tempo em que ocorre o abastecimento do equipamento D 101, pode-se realizar as devidas verificações de dispositivos e dutos do transportador e ajustes de máquina nos equipamentos de envase. Finalizadas as etapas iniciais, inicia-se o transporte de leite em pó às linhas de envase, estima-se que cada tanque destinado ao direcionamento de leite em pó às células de envase tenham um tempo de abastecimento de aproximadamente 12 minutos, totalizando 1 hora, isto por que são 5 tanque e cada um receberá 500 kg de leite em pó. O tempo de envase foi determinado a partir da capacidade de envase dos equipamentos já utilizados pela empresa em questão, cada dispositivo pode envasar 18 kg de leite em pó por minuto, sendo assim, pode-se estimar que um tanque com aproximadamente 500 kg levará aproximadamente 28 minutos para se esvaziar e posteriormente ser reabastecido.

4.2 Levantamento de custos

Os custos envolvidos no projeto do novo sistema de transporte pneumático foram baseados na construção e instalação dos dutos e tanques do transportador pneumático e compra de válvulas e exaustores centrífugos. Os custos de cada equipamento e serviço estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Custos dos equipamentos e serviços para a instalação do novo sistema de transporte pneumático

Equipamento ou serviço	Custo	Quantidade
Instalação dos dutos, tanques e válvulas	R\$ 980,00/dia	3 dias
Válvula rotativa 0,75 cv	R\$ 3950,00/unidade	7 unidades
Válvula guilhotina pneumática	R\$ 2920,00/unidade	10 unidades
Exaustor centrífugo 3 cv	R\$ 3329,47/unidade	2 unidades
Construção do duto de transporte	R\$ 380,00/m ²	13,17 m ²
Construção dos tanques	R\$ 140,00/m ²	52,33 m ²

Fonte: Do autor (2018).

Com base nos valores apresentados, estima-se que o custo de implementação para o novo sistema de transporte pneumático seja de R\$ 78779,74. Pode-se verificar que o custo para a instalação do novo sistema de transporte é elevado, mesmo considerando somente os elementos citados no Quadro 5, sem fazer menção a todos os instrumentos de controle e instalações elétricas.

Para comparar o gasto com energia elétrica entre o sistema atual e o novo proposto, evidenciaram-se os principais equipamentos em constante uso em cada transportador e estimou-se o tempo de funcionamento de cada dispositivo durante um mês. Os dados dos principais equipamentos nos sistemas de transporte helicoidal e pneumático estão apresentados nas Tabelas 6 e 7 respectivamente.

Tabela 6 - Potência dos principais equipamentos elétricos que compõem o atual sistema de transporte

Equipamento	Quantidade	Potência (W)	Tempo de funcionamento
Motor elétrico 10 cv	1	7354,99	160 horas/mês
Motor elétrico 3 cv	5	2206,50	
Motor elétrico 0,75 cv	5	551,62	

Fonte: Do autor (2018).

Tabela 7 - Potência dos principais equipamentos elétricos que compõem o novo sistema de transporte

Equipamento	Quantidade	Potência (W)	Horas de funcionamento/mês
Exaustor centrífugo 3 hp	1	2237,10	160 horas/mês
Válvula rotativa 0,75 cv	6	551,62	

Fonte: Do autor (2018).

Com base nos dados apresentados nas Tabelas 6 e 7 foi possível determinar que o sistema de transporte atual tem um gasto de energia elétrica de aproximadamente R\$ 2.630,62, já o novo sistema proposto teria um gasto de R\$ 689,73, uma economia de energia de R\$ 1940,89. Se analisarmos o *Payback* do investimento somente com base na economia de energia elétrica, o retorno aconteceria em 41 meses.

4.3 Avaliação e discussão dos resultados

O projeto para o novo sistema de transporte pneumático teve como proposta o desenvolvimento teórico e avaliação das principais características de um transportador pneumático bem como os dispositivos que podem compor a estrutura deste sistema. O tema central para este trabalho de conclusão surgiu a partir de uma oportunidade de melhoria em uma empresa produtora de leite em pó. O atual sistema de transporte de leite em pó utilizado pela empresa, o qual consiste de roscas helicoidais

dais que distribuem o produto final da saída de um leite fluidizado até as linhas de envase, tem como principais problemas o inadequado dimensionamento do sistema, segurança e qualidade final do produto.

Os transportadores helicoidais de leite em pó utilizados pela empresa em questão são individualizados em 5 linhas a partir de um tanque pulmão de distribuição, onde helicoides têm por finalidade transportar o leite em pó do tanque às linhas de envase, porém uma das roscas helicoidais opera em sobrecarga, enquanto as demais estão transportando abaixo do esperado. O transporte abaixo do esperado acarreta em gasto desnecessário de energia, uma vez que as roscas possuem um motor para suportar determinada carga para o carregamento de leite em pó, porém transportam metade de sua capacidade. Já a rosca em sobrecarga de material, pode vir a gerar problemas em relação à segurança e qualidade do produto, além de paradas de manutenção. Uma vez sobrecarregada com leite em pó, a rosca helicoidal com excesso de material pode provocar a fricção do produto com as extremidades dos helicoides e a contenção do dispositivo. Esta fricção pode condicionar temperatura e pressão adequada para que o leite em pó se aglomere e vitrifique-se, gerando problemas de granulometria fora do padrão e muitas vezes contaminação do produto com metais, podendo o helicoide entortar-se com a sobrecarga e vir a friccionar-se com a parede interna, podendo soltar pedaços ou resquícios de material constituinte de sua proteção. Isto pode ocasionar a contaminação do produto e consequentemente afetar diretamente sua qualidade final. Estes problemas geram retrabalho e paradas de manutenção, itens que muitas vezes quando não tratados, podem reduzir a margem de lucro de empresas.

Para eliminar estes problemas citados, propôs-se o desenvolvimento de um transportador pneumático para o transporte de leite em pó da saída do leite fluidizado até as linhas de envase. A finalidade do transportador proposto é de eliminar a utilização de roscas ao longo do processo, facilitar o controle e otimizar o transporte, com isso, eliminando paradas de manutenção e garantir a qualidade do produto final.

5 CONCLUSÃO

O intuito deste projeto foi o desenvolvimento teórico de um transportador pneumático para uma empresa produtora de leite em pó localizada no Vale do Taquari. O objetivo deste novo sistema é transportar o leite em pó da saída de um leito fluidizado até as linhas de envase.

Para desenvolver este projeto, foram necessários conhecimentos nas diversas áreas da Engenharia Química, em especial, conteúdos antes vistos na disciplina de Operações Unitárias I, onde se estudou o dimensionamento de transportadores pneumáticos. A partir da literatura existente nesta área foi possível determinar os parâmetros de funcionamento e estrutural de um transportador pneumático. Com os valores obtidos foi possível prever o funcionamento do sistema de transporte do sólido quanto a sua fluidização, sendo o sistema caracterizado em fase diluída.

A partir dos resultados apresentados ao longo do projeto, percebe-se a facilidade em determinar as principais características do sistema de transporte pneumático na teoria, a grande dificuldade é analisar a viabilidade econômica do projeto. Espera-se que um transportador pneumático tenha melhor otimização, confiabilidade e baixo custo de manutenção, se comparado com um transportador do tipo helicoidal para o transporte de leite em pó. Porém faz parte das atribuições de um engenheiro avaliar o custo de instalação e operação de um sistema deste porte, pois espera-se um rápido retorno financeiro no âmbito industrial. Por este motivo, é necessário orçar

o projeto com muito cuidado, já que gastos além do esperado podem comprometer financeiramente uma empresa.

Com relação ao levantamento de custos, onde simulou-se os principais gastos na implementação deste trabalho, estes demonstram que para o desenvolvimento e aplicação de um projeto de melhoria deste porte, que visa a substituição de todo o sistema de transporte helicoidal por um pneumático, necessita de planejamento, estudo teórico e prático, fatores que podem aumentar a margem de efetividade e garantir o dimensionamento adequado de um sistema, proporcionando funcionamento pleno e que traga proventos a longo prazo.

Analisando os gastos do novo sistema proposto, obteve-se um total de custos de R\$ 78779,74, valor relativamente elevado, mesmo considerando alguns itens envolvidos no atual projeto. Por motivos de inacessibilidade a determinados orçamentos de equipamentos e serviços, não considerou-se a compra e instalação de um desumidificador para o ar de entrada do sistema de transporte, instalação de toda a parte elétrica, programação e calibração dos instrumentos de indicação, transmissão e controle de variáveis, os quais estão descritos no P&ID (FIGURA 29). Todos os itens citados que não foram considerados no custo de implementação podem agregar ao orçamento de instalação altos valores, aumentado ainda mais o atual custo estipulado para a implementação de um novo sistema de transporte pneumático.

Ao longo do trabalho identificou-se oportunidades para o desenvolvimento de estudos ainda mais aprofunda neste projeto, uma vez que este teve como principal objetivo propor um sistema de transporte pneumático na teoria, o que oportuniza para futuros trabalhos o desenvolvimento de testes em *softwares* de simulação ou até mesmo a construção de uma escala piloto deste transportador pneumático para aplicações em disciplinas nas mais diversas áreas da engenharia.

O período de desenvolvimento do projeto representou um semestre de aprendizado, no qual foi possível relacionar diversas disciplinas estudadas ao longo da graduação de Engenharia Química com a prática do profissional. Foi desafiador propor o desenvolvimento teórico de um transportador pneumático para o transporte de leite em pó, entretanto gratificante chegar ao fim com um projeto. Este sentimento está aliado ao cotidiano do profissional de Engenharia Química.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8190**: Simbologia e instrumentação. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

BORTOLAIA, L. A.; ANDRIGHETTO, P. L.; BENATTI, M. **Avaliação técnica de um transportador pneumático de grãos por aspiração**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 526-529, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782008000200037&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 10 mai. 2018.

BRASIL. Ministério do Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução normativa nº 51, de 18 de setembro de 2002**. Disponível em <<http://www.leitebrasil.org.br/legislacao.htm>>. Acesso em: 15 mai. 2018.

BRASIL. Ministério do Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução normativa nº 27, de 12 de junho de 2007**. Disponível em <[http://www.aladi.org/nsfaladi/normasTecnicas.nsf/09267198f1324b64032574960062343c/4207980b27b39cf903257a0d0045429a/\\$FILE/IN%20N%C2%BA%2027-2007.pdf](http://www.aladi.org/nsfaladi/normasTecnicas.nsf/09267198f1324b64032574960062343c/4207980b27b39cf903257a0d0045429a/$FILE/IN%20N%C2%BA%2027-2007.pdf)> Acesso em: 15 mai. 2018.

CÔNSOLI, M. A.; NEVES, M. F. **Estratégias para o leite no Brasil**. São Paulo: Atlas/Pensa, 2006.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2012.

CREMASCO, M. A.; MELO, K. P. **Rheological characterization of recovery yeast (*Sacchariomyces cerevisiae*) cream from brewing process**. Chemical Engineering Transaction, v. 21, p. 763, 2010.

DICKNOW, S. R. **Dimensionamento de transportador pneumático para resíduos de cereais**. 66 f. Monografia (Graduação) – Curso do Engenharia Mecânica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2013.

DIRECT INDUSTRY. **Cyclone separator**. Disponível em: < <http://www.directindustry.com/prod/metso-corporation/product-9344-779929.html>>. Acesso em: 14 mai. 2018.

DUARTE, L. C.; JUCHEM, P. L.; PULZ, G. M.; BRUM, T. M. M.; CHODUR, N.; LICCARDO, A.; FISCHER, A. C.; ACAUAN, R. B. **Aplicações de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistemas de energia dispersiva (EDS) no estudo de gemas: Exemplos brasileiros**. The Journal of biological chemistry, v. 30, n. 2, p. 3 – 15, 2003.

DYNAMIC AIR®. **Sistemas e componentes para transportes pneumáticos**. São Paulo. Disponível em: < <http://www.dynamicaire.com.br/>>. Acesso em: 12 mai. 2018.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W. **Princípios das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

FELIPPO FILHO, G. **Bombas, ventiladores e compressores: fundamentos**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015.

GOMIDE, R. **Operações unitárias: Operações com sistemas sólidos granulares**. 1. ed. São Paulo: R. Gomide, 1983.

GOMIDE, R. **Operações unitárias: separações mecânicas**. v. 3. São Paulo: R. Gomide, 1980.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da pecuária mundial**. 2015. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e escoamento de fluidos: Ênfase na indústria do petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002

MAGALHÃES, A. C. **Desenvolvimento e avaliação de uma máquina recolhadora de café em terreno utilizando transporte pneumático**. Viçosa: UFV, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, 2003. Disponível em: <<http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/346/177978f.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

MASSARANI, G. **Problemas em sistemas particulados**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

MATOS, S. P. **Operações Unitárias: fundamentos, transformações e aplicações dos fenômenos físicos e químicos**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 7. ed. Boston: McGraw-Hill, 2005.

MILLS, D. **Pneumatic conveying design guide**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth Heinemann, 2004.

NICOLINI, C. **Leite em pó**. 57. f. Monografia (Graduação) – Curso do Engenharia Alimentos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008.

NONNENMACHER, H. **Projeto, construção e teste de um transportador pneumático de grãos**. Santa Maria: UFSM. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, 1983.

OLIVEIRA FILHO, U. C. **Desenvolvimento de um secador spray para obtenção de pós finos de precursores de nióbio**. 2007. F. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Área de Concentração: Engenharia de Processos – Natal, 2007.

PADIX. **Sistemas industriais de movimentação de pós e grãos**. Disponível em <<https://www.padix.com.br/index.html>>. Acesso em: 13 mai. 2018.

PERRY, R.H.; GREEN, D. W. **Perry's chemical engineers' handbook**. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

ROSSO. **Válvula rotativa**. Disponível em: <<https://www.rosso.ind.br/produtos/valvula-rotativa/valvula-rotativa/68/va%EF%BF%BDvalvula-rotativa>>. Acesso em: 23 out. 2018.

SCHIOZER, D. **Mecânica dos fluidos**. 1. ed. São Paulo: Araguaia, 1990.

SILVA, Deodoro Ribeiro da. **Transporte pneumático**: Tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços. São Paulo: Artliber Ltda, 2005.

SILVA, Juarez S. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas**. 2. ed. Minas Geris: Aprenda Fácil, 2008.

TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; MEIRELLES, A. J. A.; PESSOA FILHO, P. A. **Operações unitárias na indústria de alimentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

TORREN, L. R. **Operações unitárias para químicos, farmacêuticos e engenheiros**: fundamentos e operações unitárias do escoamento de fluidos.

TUOHY, J. J. **Some physical properties of milk powders**. Irish Journal of Food Science and Technology, v. 13, n. 2, p. 141 – 152, 1989.

VENTISILVA. **Exaustores centrífugos**. Disponível em: <<http://www.ventisilva.com.br/exaustores-exaustores-centrifugos-2021c-2029s>>. Acesso em: 23 out. 2018.



UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900.000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09